

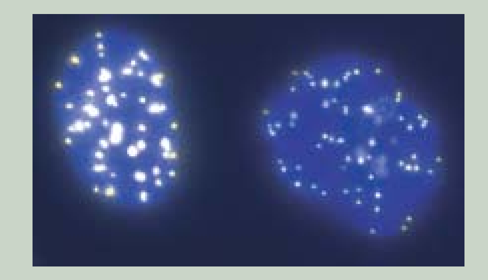
FARMACOS DE NUEVA GENERACION • NEUTRINOS SOLARES
INVESTIGACION y CIENCIA
JUNIO 2003
5,50 EURO
Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN
GINKGO BILOBA
FUTURO DEL ETNA
PROTOSEÑALES DE LA EXISTENCIA DE VIDA
EL PERIPLASMA PROCARIOTA
ASTRONOMIA GRIEGA
Y TRADICION ARABE MEDIEVAL
00321
9 770210 136004

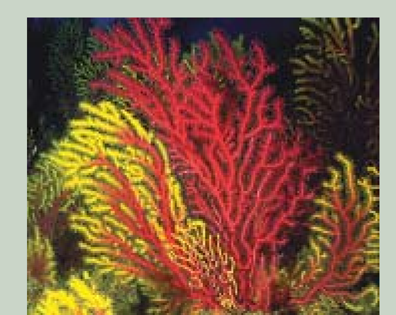


Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Junio de 2003

Número 321

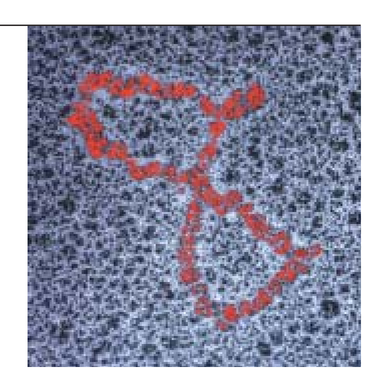




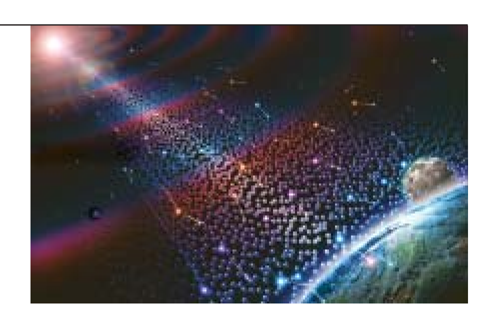
No existen pruebas concluyentes de que este suplemento vegetal muy popular refuerce, siquiera ligeramente, la memoria y otras facultades.



En su aplicación, el fármaco debe recorrer un largo camino desde el frasco de las pastillas hasta que mitiga el dolor o alcanza el foco de infección. Se buscan procesos novedosos para que la medicina llegue intacta allí donde se precisa.



A los 30 años de que se descubriese un déficit de neutrinos solares, se ha zanjado la cuestión: estas fugitivas partículas cambian de naturaleza en su camino desde el Sol.





DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
REVIEWS EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Carmina Fuster: *Nuevos métodos de administración de fármacos*; Ramón Pascual: *La resolución del problema de los neutrinos solares*; Paulina Agnew: *Futuro del Etna*; Ramón Cirera: *La astronomía griega y la tradición árabe medieval*; Sònia Ambrós: *Las primeras formas de vida, a debate*; Luis Bou: *La malla: computación sin límites* y *Aventuras problemáticas*; Alfonso Susanna: *La verdad sobre* Ginkgo biloba; J. Vilardell: *Hace..., Apuntes* e *Ideas aplicadas*; A. Garcimartín: *Perfiles*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: De *Flora Japonica*, por Siebold y Zuccarini, Leiden 1835/42

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

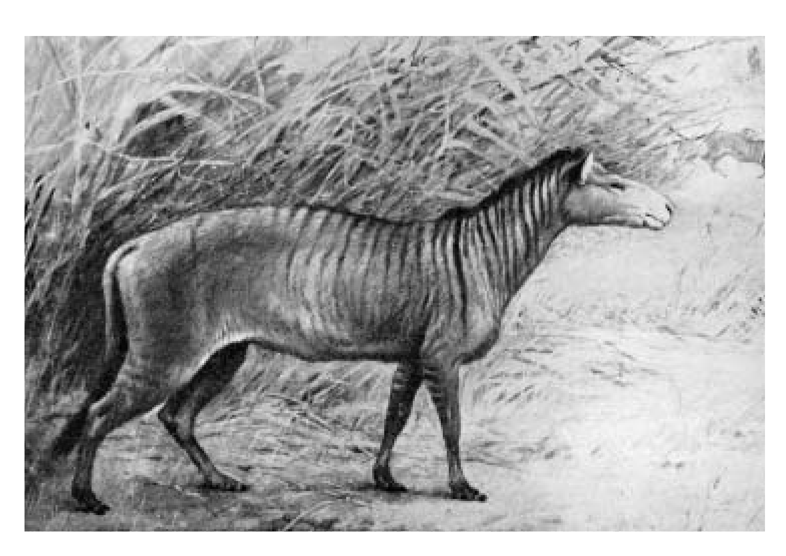


HACE

...cincuenta años

¿VERDAD O ATURDIMIENTO? "Recientemente, dos abogados y dos psiquiatras, profesores de la Universidad de Yale, publicaron una advertencia contra el uso de 'sueros de la verdad' en las investigaciones criminales. Los psiquiatras se refirieron a pruebas clínicas para mostrar que los sujetos 'normales' fácilmente ocultan lo que desean ocultar, aun bajo la influencia de una de esas drogas (amital sódico), y que los sujetos neuróticos a menudo confiesan actos que no han cometido. Las declaraciones provocadas por las drogas, afirmaron, propenden más a encerrar significados simbólicos que verdades objetivas."

UN CEPILLO QUÍMICO. "La quelación no es un descubrimiento del todo nuevo, pero hoy florece la producción por encargo de compuestos quelatos para numerosas aplicaciones, desde el ablandamiento de aguas hasta la disolución de cálculos renales. Los diversos usos de los compuestos quelatos dependen todos de una fascinante propiedad: su aptitud para asir y confinar átomos metálicos. Supongamos que nuestro suministro de agua contiene sales férricas disueltas. El hierro forma un sedimento permanente: decolora bañeras y ropas; estropea el gusto del té. En casa, es de muy difícil eliminación. Pero podemos añadir al agua una sustancia llamada EDTA: el hierro ya no dejará señales. Sin embargo, aunque no pueda detectarlo la prueba química más sensible, seguirá allí, tenazmente aprisionado —'secuestrado' en el poético lenguaje de la técnica de la quelación— por los anillos quelados de EDTA. Hasta ahora, la aplicación más extendida de la quelación ha sido el tratamiento de aguas."



El extinto Eohippus*, por Charles R. Knight, 1903*

...cien años

CABALLO DE LA AURORA. "El departamento de paleontología del Museo Americano de Historia Natural, bajo la supervisión de su conservador, el profesor Henry F. Osborn, ha montado hace poco una notable exposición sobre la ascendencia y evolución del caballo. Se exhibe en verdad el itinerario seguido desde hace al menos tres millones de años por nuestros mejores corceles de hoy. En aquellos remotos tiempos su tamaño era el de un zorro, con sólo 40 centímetros de altura; tenían cuatro o cinco dedos, y correteaban por las marismas y costas de la Tierra primitiva. Tan notable exposición, única en su género en América y en el resto del mundo, presenta material reunido por una expedición, equipada y mantenida en el terreno para buscar caballos fósiles durante dos campañas. Una colección de bellas acuarelas de Charles R. Knight (*véase la ilustración*) completa la muestra."

DEL CIELO AL RASTRO. "La gran noria de George W. Ferris, una de las atracciones de la Exposición de Chicago de 1893, fue hace poco vendida en pública subasta por 1800 dólares, motores, calderas, todo comprendido. Originalmente, el artefacto costó 362.000 dólares. Se dice que hay pendiente de pago por los propietarios una garantía por valor de 300.000 dólares, además de otros 100.000 dólares de deudas."

...ciento cincuenta años

PECES EN ABUNDANCIA. "El 'Sacramento Union' dice del río Sacramento que 'su agua debe de estar plagada de salmones; si no, las cantidades que se capturan cada día reducirían sensiblemente su número'. Los pescadores experimentados nos informan, en efecto, de que, mientras dura la temporada, por grande que sea el número de los que se dediquen a ello, o por muchos peces que se saquen cada día, no se percibe disminución. Según estimaciones, el número de hombres aplicados a la labor es de unos 600; los peces extraídos diariamente promedian 2000, lo que supone más de tres capturas diarias por hombre."

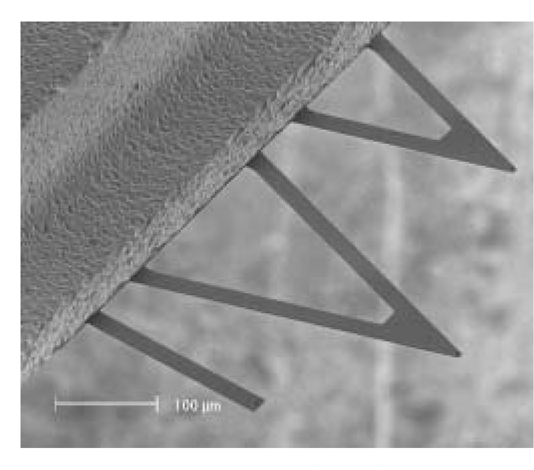
CRÓNICA DEL TOFÚ. "Los chinos preparan una suerte de queso —un queso leguminoso— hecho de soja, llamado 'tao-fú', que venden en las calles de Cantón. Para prepararlo, hierven la pasta hecha de soja en remojo, con lo que la fécula se disuelve con la caseína. Tras tamizarlo, el líquido se coagula con una solución de yeso. Ese coágulo se elabora como la leche fermentada, se sala y se moldea a presión para obtener el queso."

APUNTES

MICROSCOPIA

Triángulos y varas

Gracias a su extraordinaria finura, los microscopios de fuerza atómica son desde hace casi veinte años los instrumentos preferidos para obtener imágenes atómicas tridimensionales. Pero un matemático explica ahora que su diseño habitual falla desde la raíz. Para formar las imágenes, esos microscopios hacen uso de unas sondas, de un largo igual al ancho de un cabello humano, que palpan las superficies. En la mayoría de los instrumentos la punta se monta en el extremo de un voladizo en V. Se creía que esa forma evitaba mejor que la pestaña se doblase y la calidad de las imágenes mermara. Pero John E. Sader, de la Universidad de Melbourne, ha descubierto que la forma en V favorece esa deformación y degrada el funcionamiento del aparato. "Resultó una absoluta sorpresa, ya que la intuición sugería lo contrario", afirma. Compara este resultado con lo que ocurre cuando unos alicates atacan una plancha metálica: es más fácil doblarla por las esquinas que por el centro. Los cálculos de Sader indican que irían mejor varas rectas. *—Charles Choi*



La forma en V no es adecuada

ASTROFISICA

Neutrinos o estrellas

Del espectro de los cuásares conocidos más lejanos se deduce que para cuando emitieron su luz había todavía una fracción considerable de hidrógeno sin ionizar (al menos un 1 %) en el medio intergaláctico. Del mapa de la radiación cósmica de fondo efectuado por el satélite WMAP se deduce, en cambio, que, si la ionización se produjo de un solo golpe, tuvo que ocurrir unos 800 millones de años antes. Hace dos meses publicábamos un apunte que hablaba de una posible solución de esta discrepancia: la breve existencia de una población de estrellas muy peculiar, seguida de una recombinación parcial de los átomos. Si finalmente no encajasen bien todas las piezas para explicar de esta manera el fenómeno, habría que suponer que intervino algún mecanismo de un tipo desconocido, concluía el apunte. Steen Hansen y Zoltan Haiman ofrecen ahora uno: la desintegración de neutrinos estériles —es decir, que no participan en las interacciones cubiertas por el modelo estándar de partículas elementales—. Pesarían miles de millones de veces más que los neutrinos ordinarios (tendrían más masa que los electrones y menos que los protones). No serían fotones, en tal caso, los que arrancarían los electrones del hidrógeno, como ocurre cuando ionizan las estrellas, sino los electrones generados por la desintegración neutrínica. Quedaría ionizado alrededor de un 50 % del medio; una población de estrellas menos extraordinarias completaría el proceso hacia la época de los cuásares más remotos conocidos. Esta hipótesis da nueva vida a la idea, por ahora casi descartada, de que la materia oscura es de tipo "caliente", es decir, está compuesta por partículas muy ligeras —quizás otros neutrinos estériles más livianos que los propuestos por Hansen y Haiman como fuente de ionización cósmica—: la libra de las restricciones, fatales para ella, que se obtienen cuando sólo ionizan el universo estrellas (restricciones descubiertas, entre otros, por el propio Haiman).

PSICOLOGIA

Sospechosos inhabituales

Cuanto mayor es la confianza de un testigo en su identificación de un sospechoso, tanto más firme suele ser la prueba para el tribunal. Pero ponen en entredicho esta clásica creencia algunas constataciones de la maleabilidad de los recuerdos. En un experimento reciente de la Universidad estatal de Iowa, todos y cada uno de los 253 participantes que contemplaron la escenificación en vídeo de un crimen eligieron a un sospechoso de una rueda de seis hombres —aunque entre éstos no se hallaba el culpable—. Ignorantes de su error, los testigos a quienes se afirmaba que habían identificado correctamente al sospechoso tendían a exagerar más su confianza y su supuesto buen recuerdo de los detalles, incluidos los rasgos faciales del criminal. Esa falsa certeza prevalecía tanto si oían aquella afirmación inmediatamente o al cabo de 48 horas. Concluyen los investigadores de Iowa que los responsables de la ley deben refrenar los comentarios acerca de los sospechosos durante la rueda y obtener las declaraciones de los testigos acerca de su grado de certidumbre sin más dilación a fin de no corromper futuros testimonios. *—Sarah Simpson*



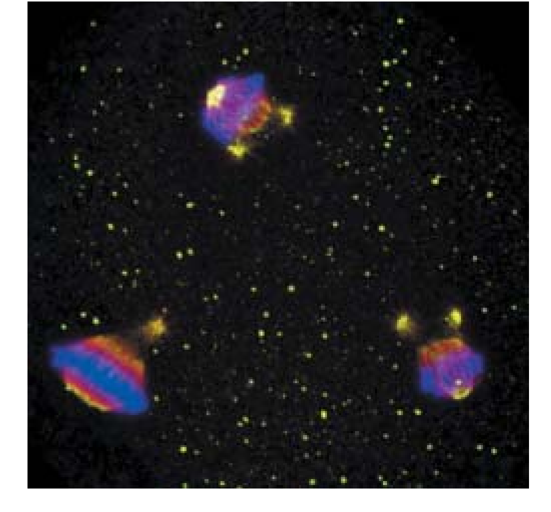
Las ruedas de identificación no empezaron ayer —ésta es de Chicago en 1927—, pero los comentarios que a continuación haga la policía a los testigos pueden causarles una falsa certidumbre

SIMON CRAWFORD *Universidad de Melbourne (arriba)*; UNDERWOOD & UNDERWOOD *Corbis (abajo)*

BIOTECNOLOGIA

Clones estropeados

Pese a las declaraciones de una secta ufológica y del médico visionario Severino Antinori, es opinión de la mayoría de los científicos que los actuales métodos de clonación no pueden dar un hijo viable. Ahora, nuevas investigaciones sugieren que la clonación de primates muy bien pudiera ser imposible. Se ha intentado la clonación de macacos Rhesus, con el resultado de que ninguno de los embriones sobrevivió a la implantación en una madre suplente. Los investigadores descubrieron que, aunque la división celular parecía a primera vista normal, los cromosomas se repartían desigualmente: unas células acababan con un exceso de cromosomas y otras con un número insuficiente. Los husos mitóticos separan los extremos opuestos de una célula en trance de dividirse y aseguran que los cromosomas se fraccionen por igual. En los óvulos normales de macacos Rhesus se concentran cerca de los cromosomas proteínas vitales de los husos; durante los primeros pasos de cada una de las cuatro técnicas de transferencia nuclear que probaron los investigadores se las eliminaba inadvertidamente. La ubicación de las proteínas de los husos podría dificultar la clonación de células madre embrionarias "e imposibilitar la clonación reproductiva", afirman los investigadores. *—Charles Choi*

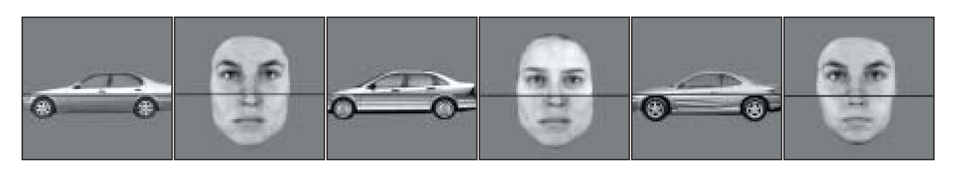


División defectuosa: los husos mitóticos (rojo) *separan los cromosomas* (azul) *en unos óvulos clonados de macaco durante el proceso de división celular. En los primates, los cromosomas no se reparten adecuadamente*

PERCEPCION

Caras en un atasco

Parece que los aficionados a los coches reconocen los modelos con los mismos circuitos neurales que reconocen los rostros. Un grupo de psicólogos mostró a 40 hombres —20 muy interesados por los coches y 20 ignorantes al respecto— imágenes alternadas de vehículos y caras. Se conectaron electrodos a los cerebros de los sujetos. Tenían que mirar sólo la mitad inferior de las imágenes y compararlas esos rostros y automóviles con los vistos previamente en la secuencia. Se halló que los desconocedores tenían que ensamblar mentalmente las partes de cada automóvil para identificar el modelo, aunque eran capaces de reconocer las caras "holísticamente", es decir, de una sola vez. Los amantes de los coches, en cambio, percibían los vehículos holísticamente, e igualmente las caras. Este uso de las mismas regiones cerebrales para reconocer coches y rostros les causaba un atasco perceptivo: a los entusiastas del automóvil les costaba más reconocer caras que a los legos. Esta investigación pone en tela de juicio la idea de que hay una zona del cerebro especializada en reconocer rostros. *—Philip Yam*



Recordando coches y caras durante una secuencia de imágenes, los sujetos fijaban su atención en las medias imágenes inferiores

ECOLOGIA FORESTAL

Bosques de carbono

Los bosques son uno de los principales depósitos de carbono. Actúan como sumideros que alivian la presencia de CO_2 en la atmósfera. Los incendios forestales afectan de manera considerable al ciclo planetario del carbono. Se sabe que tienen efectos a largo plazo en la producción vegetal —que capta CO_2— y en la descomposición de la materia orgánica —que lo desprende—. Unos científicos suecos han calibrado cómo afecta la ya antigua política de prevenir y apagar los incendios —hay una corriente que la pone en entredicho— a esos efectos. Han estudiado las islas de dos lagos de su país. A mayor tamaño de la isla, mayor es la frecuencia de incendios —se supone que la razón es que una superficie mayor intercepta más rayos—; por lo demás, los bosques de unas islas y otras, creados tras la última glaciación, son similares y están sujetos a las mismas influencias. El menor tamaño, pues, remeda las consecuencias históricas de la supresión de fuegos. Han visto que en las islas más reducidas son menores tanto la productividad como la descomposición, pero ésta merma antes que aquélla en un período sin fuego. Concluyen por eso que es probable que la supresión de incendios promueva el almacenamiento de carbono en los bosques. En cambio, el calentamiento global puede hacer más frecuentes los incendios no provocados allá donde no se apaguen los fuegos y dificultar la extinción de los incendios donde sí se haga, con una disminución final en ambos casos del carbono apresado.



CORTESIA DE CALVIN SIMERLY (*arriba*); CORTESIA DE *NATURE NEUROSCIENCE* (*centro*); DOUGLAS GANTENBEIN (*abajo*)


SLIM FILMS

Nuevos métodos de administración de fármacos

En su aplicación, el fármaco debe recorrer un largo camino desde el frasco de las pastillas hasta que mitiga el dolor o alcanza el foco de infección. Se buscan procesos novedosos para que la medicina llegue intacta allí donde se precisa

Robert Langer

El sencillo acto de tomar una pastilla es el principio de un tortuoso laberinto para el medicamento. Debe superar en primer lugar el estómago y llegar intacto al intestino, para luego atravesar la pared intestinal antes de alcanzar la circulación sanguínea. Instalado aquí, el hígado hará de filtro antes de permitir que el fármaco continúe su viaje por el resto del cuerpo. En las sucesivas estaciones, el compuesto deberá resistir los ácidos gástricos, vencer membranas de barrera o defenderse de enzimas diseñadas para trocearlo en fragmentos inservibles.

Los laboratorios farmacéuticos han ideado soluciones parciales que allanen el camino de los compuestos hasta su destino. Pero no son aplicables a todos los medicamentos. Una de las estrategias consiste en recubrir las píldoras de una coraza resistente a los jugos gástricos, que se disuelve cuando alcanza el intestino delgado, más alcalino. Aun así, los medicamentos basados en proteínas (como es el caso de la mayoría de los productos sintetizados con biotecnología) deberán evitar también la actividad de las proteasas, enzimas que actúan directamente sobre las proteínas y las digieren. Se puede proteger a las píldoras con sustancias específicas (inhibidores de las proteasas) para facilitar su supervivencia; ello, sin embargo, dificulta el paso a través de la pared intestinal. Las píldoras con este recubrimiento resultan demasiado grandes para penetrar en la sangre con la misma facilidad con que lo hacen los medicamentos corrientes que, en general, se componen de micromoléculas. Los revestimientos limitan, asimismo, el control sobre la farmacocinética del medicamento, esto es, la velocidad con que llega al torrente circulatorio y el tiempo que permanece almacenado en órganos y tejidos. Un fármaco puede resultar tóxico tanto si alcanza grandes concentraciones en sangre demasiado rápido, como si permanece en ella demasiado tiempo. Por el contrario, puede tornarse ineficaz si se demora su entrada en la circulación.

La administración parenteral de un medicamento, como las inyecciones, ahorra los inconvenientes derivados de su paso por el tracto gastrointestinal, pero muchos pacientes son reticentes a pincharse varias veces o a tener que acudir a diario al médico. Desde hace veinte años se vienen diseñando multitud de sistemas alternativos de administración de medicamentos: sólo en EE.UU. la venta de medicamentos que se administran a través de parches, implantes, inyecciones de preparados de acción prolongada, geles tópicos, píldoras de liberación controlada e inhaladores nasales o pulmonares exceden los veinte mil millones de dólares al año.



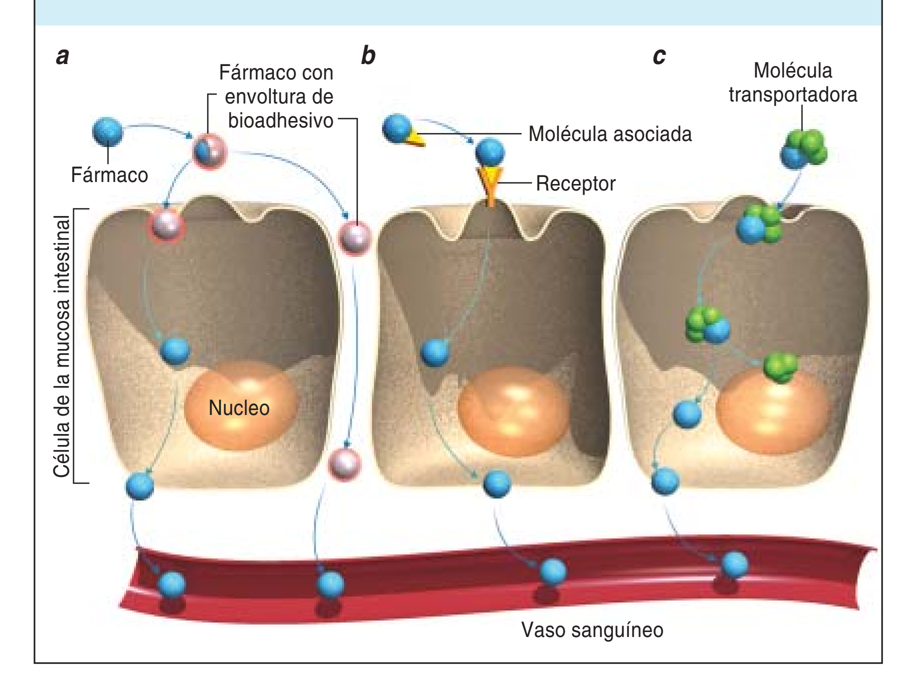
Recientemente, la autoridad competente en EE.UU. en materia de medicamentos, la Administración para la Alimentación y Fármacos (FDA), ha aprobado la comercialización de dos buenos ejemplos: Nutropin Depot y Gliadel. Nutropin Depot es un compuesto de microesferas de polímeros degradables que liberan somatotropina, la hormona del crecimiento, durante semanas después de cada inyección. Gliadel, en forma de sello, se implanta en el cerebro para la administración directa de quimioterapia sobre un tumor. En Europa se dispone ya de endoprótesis vasculares revestidas de polímeros para la liberación de medicamentos específicos que han demostrado su valía en la repermeabilización por angioplastia de arterias que presentan obstáculos al flujo sanguíneo.

Se ha explorado cada rincón del cuerpo humano (piel, nariz, pulmones e intestinos, entre otros) en busca de posibles puertas de entrada para los fármacos y para el desarrollo de sistemas no invasivos de administración de moléculas complejas. Gracias a estos esfuerzos, se ha conseguido incrementar la capacidad de absorción de un medicamento a través de la piel mediante ultrasonidos y se ha recurrido a la nanotecnia para la fabricación de microchips implantables que regulan la dosificación de principios activos de forma precisa y programada.

ATRAVESAR EL INTESTINO

RETOS: Los ácidos gástricos y las enzimas destruyen los fármacos antes de que puedan alcanzar su destino; los medicamentos encuentran dificultades para atravesar la pared intestinal.

SOLUCIONES: (*a*) Cubrir los fármacos con polímeros bioadhesivos que se pegan a la pared intestinal y que penetran entre las células intestinales; (*b*) asociar los fármacos a moléculas cuyos receptores en el intestino facilitan que la medicina penetre en las células; (*c*) unir fármacos a moléculas transportadoras que los introduzcan en las células.



SLIM FILMS

A través de la pared intestinal

Para solucionar el problema del paso a través de la pared intestinal se ha hecho un uso intensivo de las nuevas técnicas. Edith Mathiowitz y su equipo, de la Universidad Brown, han logrado, con una substancia adhesiva, un bioadhesivo, fabricar burbujas finísimas y colocar en su interior proteínas de uso médico. Las burbujas pueden penetrar en las células intestinales o colarse por los intersticios entre células. La bioadhesión (la adherencia de fármacos administrados por vía oral a las membranas mucosas) tiene su origen en los trabajos realizados en los años setenta y ochenta en los laboratorios de Tsuneji Nagai, de la Universidad Hoshi de Tokio, Joseph R. Robinson, de la Universidad de Wisconsin en Madison, y Nicholas A. Peppas, de la Universidad Purdue. Hasta hace diez años se consideraba que los bioadhesivos más prometedores eran polímeros hidrofílicos e hidrogeles. De estos estudios seminales los investigadores dedujeron que los materiales idóneos para la bioadhesión eran los polímeros más "empapables": los dotados de la mayor concentración de grupos carboxilo, que si bien se adherían a la mucosa intestinal, penetraban escasamente y liberaban las proteínas con excesiva rapidez.

Mathiowitz estudió los polianhídridos, polímeros bioadhesivos hidrófobos, que repelen el agua y presentan grupos carboxilos en el exterior cuando se erosiona su superficie externa. En 1997 observó que se unían a la mucosa intestinal tan

Resumen/*La administración de fármacos*

- Muchos fármacos —especialmente los basados en proteínas que se elaboran mediante biotecnología— pierden sus propiedades muy pronto si se toman por vía oral.
- Para superar tal inconveniente, se están desarrollando nuevas formas de administración de fármacos; entre ellas, sistemas transportables que permiten el paso de los fármacos a través de la piel, de forma indolora, mediante pulsos eléctricos o ultrasonidos.
- El futuro deparará microchips implantables que administrarán los fármacos en dosis preprogramadas y que podrán quedar registradas en la consulta de los médicos.

bien como los polímeros hidrofílicos y que, tras cruzar la mucosa intestinal, alcanzaban la corriente sanguínea de forma más rápida. Un polianhídrido en particular, el polifumárico-sebácico-anhídrido, demostró poseer fuerzas adhesivas máximas. Actualmente se está utilizando este principio para desarrollar un tipo de insulina que se pueda administrar por vía oral. La razón por la que muchos de los nuevos procedimientos de administración se ensayan con insulina es porque los diabéticos deben inyectarse esta proteína varias veces al día. En los ensayos con animales, el polianhídrido dio resultados prometedores, lo mismo con proteínas hidrófilas que hidrófobas.

Peppas y sus colaboradores también han desarrollado polímeros bioadhesivos que se hinchan en respuesta a cambios de *p*H. Podrían proteger a la insulina del *p*H ácido del estómago y liberarla en el *p*H más alcalino del intestino. Los polímeros también pueden brindar protección frente a las proteasas del intestino proximal y abrir temporalmente las uniones entre las células intestinales permitiendo que el fármaco penetre por los intersticios.

Otra estrategia para la administración oral de fármacos proteínicos consiste en asociarlos a moléculas que las transporten a través de la mucosa. En Emisphere Technologies de Tarrytown, Nueva York, se han desarrollado transportadores moleculares que modifican las proteínas y reducen su tamaño para que puedan cruzar mejor las membranas celulares. Una vez desempeñado su cometido (introducir el fármaco en el interior celular), la molécula transportadora se rompe y la proteína vuelve a su forma activa nativa. Emisphere está ensayando el método con insulina para diabéticos y también con heparina, una proteína anticoagulante que reciben las personas a las que se les va a colocar una prótesis de cadera y que, en ocasiones, desarrollan coágulos sanguíneos.

Otros científicos trabajan en unir fármacos proteínicos a moléculas con receptores específicos en el tracto gastrointestinal. Gregory J. Russell-Johnes de Biotech Australia en Roseville, Nueva Gales del Sur, ha sacado provecho de los receptores de las células intestinales que fijan la vitamina B12 y la transportan a través de la pared intestinal. Descubrió que si unía una proteína a la vitamina B12, los receptores introducían en la célula tanto la proteína como la misma vitamina. Desafortunadamente, el número de receptores de vitamina B12 pudiera no bastar para conseguir que una cantidad suficiente de fármaco alcanzara la sangre y tuviera un efecto terapéutico. Otros investigadores están realizando ensayos parecidos con lectinas, unas moléculas muy adhesivas y mucho más abundantes. Son propias del tejido conjuntivo que hay entre las células intestinales.

A través de la piel

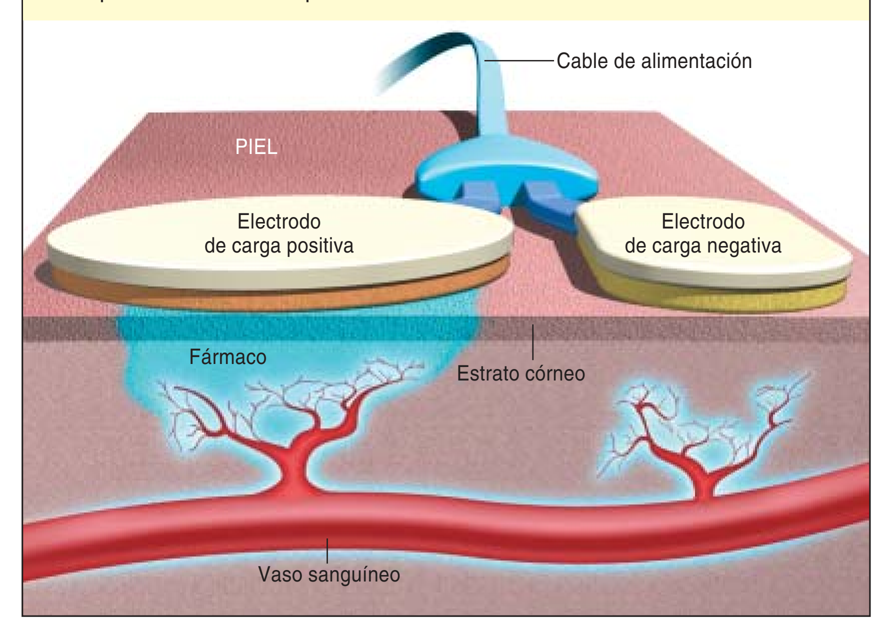
El intestino es una vía de acceso muy directa a la corriente sanguínea, pero la piel resulta mucho más accesible. Si bien la piel puede ser una barrera bastante impermeable, algunos fármacos presentan características físicas y químicas que les permiten alcanzar el torrente circulatorio en cantidad suficiente. Quién no conoce los parches transdérmicos, que duran hasta siete días y con distintas aplicaciones: de nicotina para dejar de fumar, o de estradiol, un estrógeno, para combatir los síntomas de la menopausia o como método anticonceptivo.

Mediante iontoforesis, esto es, la aplicación directa sobre la piel de una pequeña corriente eléctrica, se puede permeabilizar la epidermis a muchos fármacos, proteínas incluidas. Se precisan dos parches con carga eléctrica opuesta, positiva el uno y negativa el otro, conectados a un reservorio de medicación. Un pulso de electricidad, indoloro, impulsa al fármaco, habitualmente dotado de carga eléctrica, a través de la capa externa de la epidermis hasta los vasos sanguíneos de la dermis. Vyteris, filial de Becton Dickinson en Fair Lawn, New Jersey, ha solicitado el permiso de la FDA para comercializar un sistema de iontoforesis para lidocaína, un analgésico. La pila es tan pequeña, que se puede

A TRAVES DE LA PIEL

RETOS: el resistente estrato córneo (la capa más externa de la piel) bloquea la entrada de fármacos; muchas moléculas tienen dificultad para cruzar la epidermis y alcanzar los vasos sanguíneos de la dermis.

SOLUCIONES: la iontoforesis (*abajo*) utiliza pulsos de electricidad indoloros para conseguir la permeabilidad de la piel; los ultrasonidos emplean ondas sonoras que abren de forma transitoria microcanales en la capa externa de la epidermis.

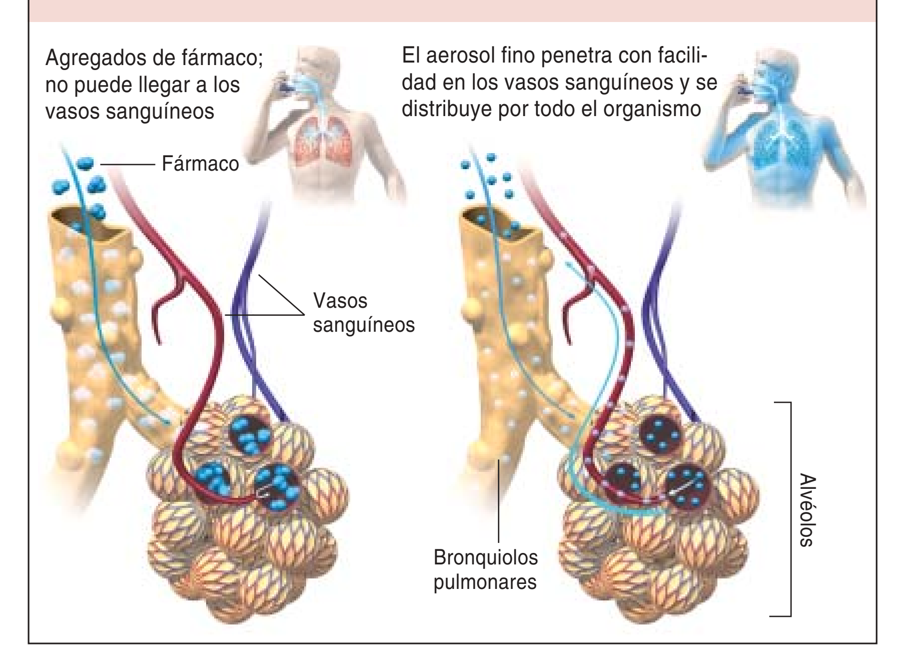


SLIM FILMS

HACIA LOS PULMONES

RETO: penetrar en los alvéolos, sacos de aire; evitar la digestión de los fármacos por células del sistema inmunitario, los macrófagos.

SOLUCIONES: optimizar el tamaño de las partículas de aerosol (líquido o polvo), de forma que puedan llegar a lo más profundo de los pulmones; evitar la agregación de las partículas para conseguir un aerosol fino.



SLIM FILMS

llevar debajo de la ropa. La empresa considera el desarrollo de ensayos clínicos para valorar la administración de dosis diaria de hormona paratiroidea en pacientes con osteoporosis o de pulsos de hormona liberadora de gonadotropinas cada 90 minutos en mujeres que se preparan para una fertilización *in vitro*.

También los ultrasonidos se han utilizado para incrementar la permeabilidad cutánea. Joseph Kost, hoy en la Universidad Ben-Gurion de Israel, descubrió que los ultrasonidos pueden alterar temporalmente el estrato córneo, la capa más externa de la piel y que constituye la principal barrera para el paso de los fármacos. Daniel Blankschtein del MIT, Samir Mitragotri y yo mismo hemos conseguido incrementar hasta cinco mil veces la capacidad de difusión de la insulina en la piel gracias a los ultrasonidos. La compañía Sontra Medical de Cambridge, Massachusetts, realiza ensayos con esta técnica para la administración de insulina y analgésicos. La energía empleada por el sistema durante apenas quince segundos es mucho más débil que la necesaria para el diagnóstico por imagen. El cuerno ultrasónico vibra a 55.000 ciclos por segundo (55 kilohertz) en un medio líquido aplicado a la piel. Esta energía ultrasónica de baja frecuencia crea sutiles burbujas que se expanden y contraen en el medio de conexión y en las membranas celulares del estrato córneo, facilitando la aparición de microcanales temporales por donde el fármaco puede entrar permeabilizando una región cutánea concreta hasta 24 horas.

A través de los pulmones

La vía pulmonar representa una importante oportunidad, pero también un desafío en el tratamiento de enfermedades pulmonares y como sistema de administración de fármacos para el tratamiento de enfermedades de cualquier otra parte del cuerpo. Los pulmones constan de sáculos microscópicos, los alvéolos, unidos directamente a los vasos sanguíneos. Durante la respiración, el oxígeno llega a la sangre a través de los alvéolos y se elimina el dióxido de carbono, producto de desecho. Por un mecanismo similar pueden alcanzar el torrente sanguíneo fármacos en forma de aerosol que contengan moléculas mayores, proteínas por ejemplo. Hasta el momento ha sido difícil diseñar sistemas de inhalación que produzcan una cantidad suficiente de partículas de aerosol de un tamaño tan pequeño como para penetrar de manera profunda en el pulmón sin desperdiciar el fármaco. La mayoría de los inhaladores tradicionales, como los que se utilizan en el tratamiento del asma, administran menos de un 10 por ciento de su contenido. Los macrófagos pulmonares, células del sistema inmunitario, pueden eliminar la mayoría de los fármacos de forma rápida.

Son muchos los investigadores y compañías que trabajan en el perfeccionamiento de los sistemas de inhalación y buscan aerosoles extremadamente finos. Aradigm de Hayward, California, ha desarrollado un sistema para formulaciones líquidas. El fármaco atraviesa unos filtros que se pueden programar para administrar dosis específicas. En

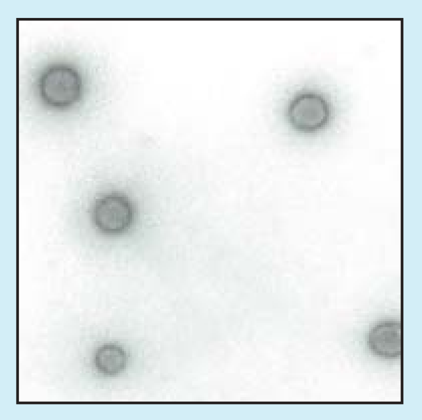
El autor

ROBERT LANGER ocupa la cátedra Kenneth J. Germeshausen de ingeniería química y biomédica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Preside, entre otras empresas, Sontra Medical y MicroCHIPS. En 2002 recibió el premio Charles Stark Draper, considerado el equivalente del Premio Nobel en el ámbito de la ingeniería. En 1998 se le otorgó el premio Lemelson-MIT por ser "uno de los inventores más prolíficos de la historia de la medicina". Langer pertenece al selecto grupo de miembros de las tres academias nacionales de Estados Unidos: el Instituto de Medicina, la Academia Nacional de Ciencias y la Academia Nacional de Ingeniería.

ADMINISTRACION DE GENES

El auténtico desafío de la terapia génica reside en la posibilidad de introducir nuevo material génico en el interior celular.





EL PLASMIDO (*arriba*) debe penetrar en la célula y empezar a funcionar para poder acometer la terapia génica. La mayoría de los tests de terapia génica aplicados a las personas se han servido de virus vectores que introducían el material génico en el interior celular. Un proceso no exento de riesgos. Por esa misma razón, se investiga ahora el método de encapsulamiento polimérico (*abajo*).

Tal como ha afirmado Inder M. Verma, del Instituto Salk para Estudios Biológicos de San Diego, son tres los desafíos de la terapia génica: administración, administración y administración. Para introducir un gen en el cuerpo, hay que concentrar el ADN correspondiente para que la célula lo pueda incorporar. Pero eso no es todo: debe también protegerse al gen de las enzimas celulares, transportarlo hasta el núcleo celular y, luego, liberarlo en forma activa. Durante años, se han venido empleando virus por vectores, verdaderos caballos de Troya que introducen disimuladamente genes extraños en las células. Estos virus, incluso desactivados, conllevan un riesgo, como se comprobó en 1999 con la trágica muerte de Jesse Gelsinger, el voluntario de un ensayo sobre terapia génica.

Al tiempo que se trabaja para conocer y reducir los peligros asociados a vectores víricos en la terapia génica, se buscan formas alternativas para transportar genes basadas en polímeros o en lípidos. Mark E. Davis, del Instituto de Tecnología de California, ha obtenido resultados esperanzadores con B-ciclodextrinas catiónicas (CD), polímeros con carga positiva.

Davis escogió las ciclodextrinas catiónicas por una triple razón: escasas toxicidad, incapacidad inmunógena y solubilidad en agua. Al principio intentó condensar el ADN únicamente en partículas de ciclodextrinas de tamaño nanométrico, pero esta combinación resultaba inestable cuando se administraba a animales. Con su colaboradora Suzie Hwang Pun, Davis decidió alterar la superficie de las partículas de ciclodextrinas mediante adición de polietilenglicol (PEG) conjugado con adamantano. La modificación producía nanopartículas de ciclodextrinas y ADN de tamaño uniforme que se resistían a conformar agregados inútiles con proteínas del suero.

La adición de los compuestos de polietilenglicol en la superficie de las partículas les proporcionó verdaderos ganchos químicos mediante los que aprehender otras moléculas y administrar los genes a determinados tipos celulares. Insert Therapeutics, de Pasadena, California, fundada por Davis y en la que trabaja actualmente Pun, está realizando ensayos para comprobar si estos complejos se pueden utilizar en el tratamiento de algunos tipos de cáncer y enfermedades hepáticas.

David M. Lynn, de la Universidad de Wisconsin en Madison, también trabaja en el desarrollo de polímeros especializados como vectores de terapia génica. Lynn, antiguo becario posdoctoral en el laboratorio del autor en el MIT, ha sintetizado una extensa serie o biblioteca de polímeros catiónicos biodegradables llamados poliaminoésteres. En colaboración con Daniel Anderson y David Putnam, Lynn ha fabricado cientos de tales polímeros y ha desarrollado una serie de métodos para identificar los más útiles en función de su capacidad de unión del ADN, su solubilidad en el suero y su capacidad de penetrar en el interior de las células. De esta manera, se han identificado una serie de polímeros más eficientes que los vectores no víricos habituales, como lipofectamina y polietilenamina.

Fred E. Cohen, de la Universidad de California en San Francisco, también ha recurrido al método de la biblioteca. En colaboración con Ronald Zuckerman, de los laboratorios Chiron, Cohen ha sintetizado una nueva clase de polímeros, los peptoides, oligómeros de glicina catiónicos con sustitución *N*. Algunos de ellos condensan ADN en partículas de entre 50 y 100 nanómetros, aptos para penetrar en el interior celular.

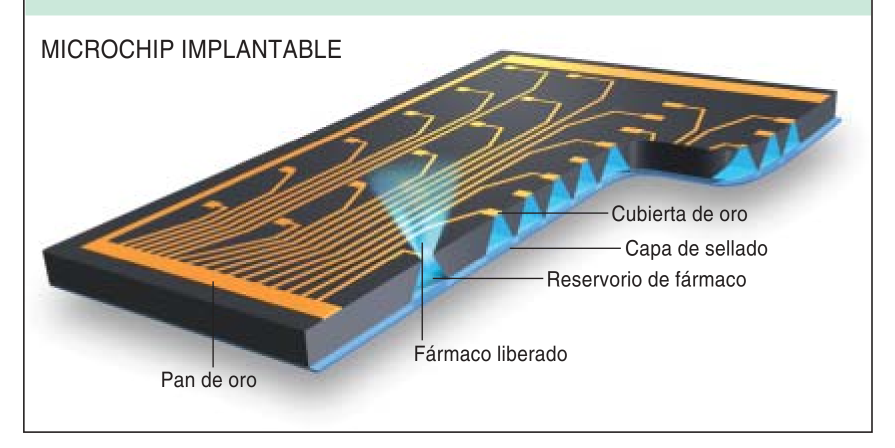
Los lípidos también son útiles en la administración de terapia génica, como demuestran los trabajos de Sung Wan Kim, de la Universidad de Utah. Kim recubre el gen que se quiere administrar con una vaina de estearilpolilisina que luego envuelve con lipoproteínas de baja densidad. En estudios con conejos, él y a sus colaboradores han logrado administrar el gen del factor de crecimiento vasculoendotelial en miocardio dañado por falta de oxígeno, como sucede cuando se obstruye un vaso sanguíneo. Kim se plantea comenzar un estudio con pacientes con cardiopatía isquémica. Cifra su esperanza en que el gen del factor de crecimiento vasculoendotelial estimulará el desarrollo de nuevos vasos sanguíneos que aporten oxígeno y nutrientes al miocardio afectado.

J. L. CARSON *Custom Medical Stock Photo* (*arriba*); MARK E. DAVIS Y SUZIE HWANG PUN *Instituto Tecnológico de California* (*abajo*)

CONTROLAR LAS DOSIS

RETOS: mantener niveles terapéuticos estables del fármaco en el organismo, al tiempo que se evita la necesidad de repetir la administración.

SOLUCIONES: microchips implantables con depósitos de medicación, recubiertos por un pan de oro, que se disuelve al producirse una pequeña descarga eléctrica y libera el fármaco cuando es preciso.



SLIM FILMS

Nectar Therapeutics de San Carlos, California, mezclan polvo seco con aire comprimido y se forma una nube de aerosol de pequeñas partículas que alcanzan las regiones más profundas de los pulmones. Ambas compañías están realizando también ensayos con insulina que no requiera el uso de inyecciones.

A mediados de la década de los noventa, los científicos no prestaban demasiada atención a las partículas de aerosol. David A. Edwards, docente hoy en la Universidad de Harvard, razonó que si se disminuía la densidad de las partículas a la par que se incrementaba su tamaño y su porosidad, su tendencia a la agregación debía reducirse. Así, un inhalador pequeñísimo y simple debía bastar para que el aerosol llegara hasta los pulmones. Considérese, por ejemplo, la diferencia entre balones de fútbol mojados y granos de arena húmedos. Es obvio que los últimos tienen una tendencia a adherirse entre sí mucho mayor que los primeros.

Al aumentar el tamaño de las partículas, Edwards pensó que también podría conjurar su eliminación por los macrófagos pulmonares, cuya tendencia es la de rodear las micropartículas y destrozar los fármacos. Edwards y otros científicos, entre ellos el autor, demostraron que una sola dosis de insulina formulada en un aerosol de partículas grandes puede durar hasta cuatro días en los pulmones de animales. El método se está ensayando en humanos con diversos fármacos en Alkermes, Cambridge, Massachusetts, en colaboración con varios laboratorios farmacéuticos.

Microchips inteligentes

Los sistemas inteligentes de administración de fármacos revisten especial interés. En respuesta a señales químicas en el organismo, liberarían fármacos de forma que su concentración en el organismo se mantuviera dentro de un nivel terapéutico deseado.

Hace unos años, cuando el autor estaba viendo un programa de televisión sobre la fabricación de chips de silicio para computadores, concibió la posibilidad de aplicarlos a la administración de fármacos. Junto con Michael J. Cima, experto en procesamiento de cerámicas del MIT, convenció a John T. Santini Jr., de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, para que estudiara esta posibilidad como proyecto de investigación de verano. Santini, que acabó realizando el doctorado en el MIT, desarrolló un método para crear microchips de silicio que contuvieran una serie de reservorios rellenables con medicación y que estuvieran recubiertos por un fino pan de oro. La aplicación de una corriente eléctrica de un volt a uno o más de los pocitos disuelve el recubrimiento áureo y libera el fármaco. Santini preside ahora MicroCHIPS en Bedford, que está desarrollando el método para su ensayo en humanos.

Los microchips se podrían implantar por debajo de la piel, en la médula espinal o en el cerebro para liberar fármacos analgésicos o aplicar quimioterapia contra el cáncer. Los estudios en animales de James Anderson y sus colaboradores, de la Universidad Case Western Reserve, han demostrado que los materiales de los microchips no son incompatibles con tejidos vivos y que es poco probable que produzcan efectos secundarios. Los sistemas basados en chips, que incluirían una pila pequeña, serían sencillos de manejo y podrían controlar de forma precisa la cantidad de fármaco que el paciente consume. Los datos facilitados por estos sistemas podrían descargarse en un computador en el domicilio, en la consulta del médico o en el hospital y permitirían un registro actualizado de la historia farmacológica del paciente. ChipRx, de Lexington, Ky., está desarrollando sistemas implantables sensibles a la concentración medicamentosa.

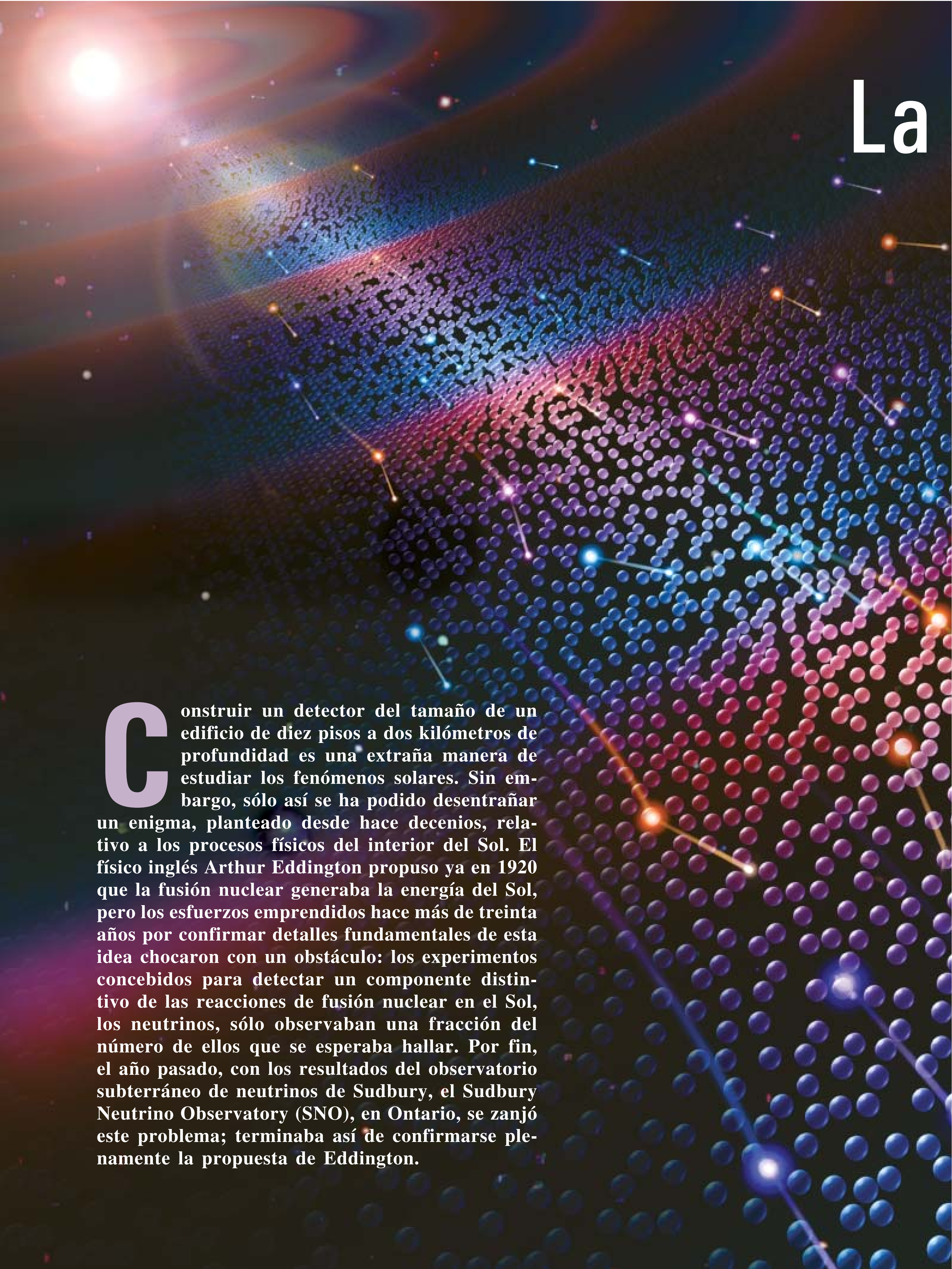
Esperamos ansiosos el día en que cualquier fármaco pueda administrarse en el momento preciso en la dosis apropiada en cualquier parte del organismo de forma específica y eficiente.

Bibliografía complementaria

DRUG DELIVERY AND TARGETING. Robert Langer, en *Nature*, vol. 392 (suplemento), págs. 5-10; 30 de abril de 1998.

DRUG DELIVERY: DRUGS ON TARGET. Robert Langer, en *Science*, vol. 293, págs. 58-59; 6 de julio de 2001.

ULTRASOUND-ASSISTED INSULIN DELIVERY AND NONINVASIVE GLUCOSE SENSING. Joseph Kost, en *Diabetes Technology and Therapeutics*, volumen 4, n.º 4, págs. 489-497; 2002.



La

Construir un detector del tamaño de un edificio de diez pisos a dos kilómetros de profundidad es una extraña manera de estudiar los fenómenos solares. Sin embargo, sólo así se ha podido desentrañar un enigma, planteado desde hace decenios, relativo a los procesos físicos del interior del Sol. El físico inglés Arthur Eddington propuso ya en 1920 que la fusión nuclear generaba la energía del Sol, pero los esfuerzos emprendidos hace más de treinta años por confirmar detalles fundamentales de esta idea chocaron con un obstáculo: los experimentos concebidos para detectar un componente distintivo de las reacciones de fusión nuclear en el Sol, los neutrinos, sólo observaban una fracción del número de ellos que se esperaba hallar. Por fin, el año pasado, con los resultados del observatorio subterráneo de neutrinos de Sudbury, el Sudbury Neutrino Observatory (SNO), en Ontario, se zanjó este problema; terminaba así de confirmarse plenamente la propuesta de Eddington.

resolución del problema de los neutrinos solares

El Observatorio de Neutrinos de Sudbury ha despejado un enigma planteado hace 30 años al demostrar que los neutrinos provenientes del Sol cambian de clase en su camino hacia la Tierra

Arthur B. McDonald, Joshua R. Klein y David L. Wark

SLIM FILMS

Como todos los experimentos subterráneos diseñados para estudiar el Sol, el SNO persigue detectar neutrinos, que se producen en grandes cantidades en el núcleo solar. Pero al contrario que la mayoría de las instalaciones construidas en las tres décadas anteriores, el SNO detecta los neutrinos solares con agua pesada, en la que cada átomo de hidrógeno de las moléculas de agua está ligado a un neutrón (es decir, ese hidrógeno se encuentra en la forma del isótopo deuterio). Esos neutrones adicionales permiten al SNO observar los neutrinos solares de una nueva manera, contando por igual los tres tipos, o "sabores", de neutrinos. Así, el SNO ha demostrado que el déficit de neutrinos solares visto en los experimentos anteriores no era el resultado de mediciones imprecisas, ni de que no se supiese bien qué pasaba en el Sol, sino el descubrimiento de una nueva propiedad de los neutrinos mismos.

Pero la confirmación de la mejor teoría acerca del Sol saca a luz el primer fallo del modelo estándar de la física de partículas, la mejor teoría acerca de los constituyentes fundamentales de la materia. Ahora conocemos el Sol mejor que el universo microscópico.

El problema

El primer experimento sobre los neutrinos solares, realizado en los primeros años sesenta por Raymond Davis, Jr., de la Universidad de Pennsylvania, y sus colaboradores, quería ser a la vez una triunfante confirmación de que la fusión generaba la energía solar y el inicio de un nuevo campo, donde los neutrinos nos harían saber más acerca del Sol. El experimento de Davis, localizado en la mina de oro de Homestake, cerca de Lead, en Dakota del Sur, detectaba neutrinos mediante una técnica radioquímica. El detector contenía 615 toneladas métricas de tetracloroetileno líquido, el fluido que se utiliza para la limpieza en seco. Los neutrinos transformaban los átomos de cloro del fluido en átomos de argón. Pero en vez de crearse un átomo de argón cada día, tal y como predecía la teoría, Davis observó sólo uno cada 2,5 días. (En el año 2002 Davis compartió el premio Nobel con Masatoshi Koshiba, de la Universidad de Tokio, por sus trabajos, que abrieron camino en la física de neutrinos.) Los experimentos realizados en los treinta años siguientes encontraron resultados similares pese a que empleaban una gran variedad de técnicas diferentes. El número de neutrinos procedentes del Sol siempre era a las claras menor que el total predicho; en algunos casos no llegaba ni a un tercio, en otros se quedaba en tres quintos, dependiendo de las energías de los neutrinos estudiados. Hasta que no se supiese por qué diferían tanto predicciones y medidas, habría que dejar de lado el objetivo original de estudiar el núcleo solar mediante la observación de los neutrinos que emitía.

Mientras los físicos experimentales seguían con sus experimentos neutrínicos, los teóricos mejoraron los modelos con que se predecía la generación de neutrinos solares. Pese a su complejidad, parten sólo de unas pocas hipótesis acerca de la energía solar: que es generada por reacciones nucleares que modifican las abundancias de los elementos, que crea una presión hacia afuera que se equilibra con la atracción hacia dentro de la gravedad y que la transportan hacia el exterior fotones y fenómenos de convección. Los modelos solares siguieron prediciendo flujos de neutrinos que superaban los medidos, pero otras de sus predicciones, el espectro de las vibraciones heliosísmicas de la superficie solar por ejemplo, concordaban muy bien con las observaciones.

La misteriosa diferencia entre las predicciones y las medidas vino a conocerse como el "problema de los neutrinos solares". Aunque muchos físicos aún creían que las dificultades inherentes a la detección de neutrinos y al cálculo de su ritmo de producción en el Sol eran, de una u otra manera, la causa de la discrepancia, una tercera posibilidad ganó muchos adeptos a pesar de sus revolucionarias implicaciones. El modelo estándar de la física de partículas mantiene que hay tres "sabores" de neutrinos sin masa, que no se mezclan entre sí: el neutrino electrónico, el neutrino muónico y el neutrino tau. Las reacciones de fusión en el centro del Sol sólo pueden producir neutrinos electrónicos; los experimentos del tipo del de Davis estaban pensados para que buscaran ese sabor (a las energías de los neutrinos solares sólo los neutrinos electrónicos pueden convertir los átomos de cloro en argón). Pero si el modelo estándar fuese incompleto y los sabores de los neutrinos no estuvieran separados del todo, sino que, de alguna forma, se mezclasen, los neutrinos electrónicos del Sol podrían transformarse en uno de los otros sabores y así escapar a la detección.

No hay mecanismo de cambio del sabor de los neutrinos mejor considerado que la oscilación neutrínica (*véase el recuadro* "La detección de los neutrinos variables"); requiere que los sabores de los neutrinos (los neutrinos del electrón, del muon y del tau) estén constituidos por mezclas de estados de neutrinos (designados por 1, 2 y 3) con masas diferentes. Un neutrino electrónico podría entonces ser una mezcla de los estados 1 y 2, y un neutrino muónico una mezcla diferente de los dos mismos estados. La teoría predice

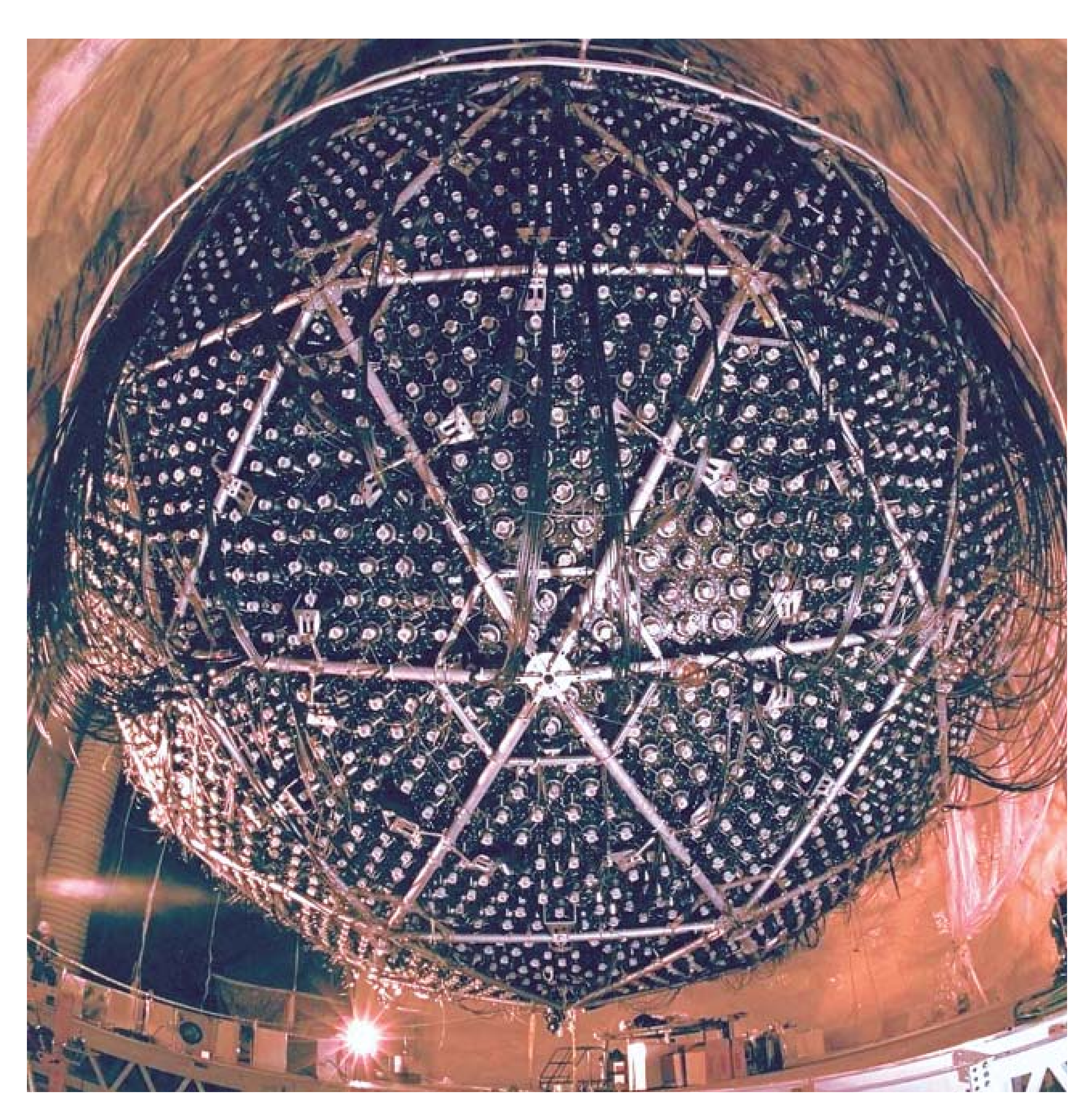
Resumen/*Oscilaciones de neutrinos*

- Desde los años sesenta, los experimentos subterráneos han venido contando muchos menos neutrinos electrónicos procedentes del Sol de los que predice la teoría. "Problema de los neutrinos solares" se llama a esta situación.
- En el año 2002 el Observatorio de Neutrinos de Sudbury (SNO) resolvió el problema de los neutrinos solares al determinar que muchos de los neutrinos electrónicos producidos en el interior del Sol cambian a otros sabores neutrínicos antes de llegar a la Tierra; por eso no daban con ellos los anteriores experimentos.
- Los resultados del SNO confirman la exactitud de nuestros conocimientos acerca de la generación de energía en el Sol. Además, se infiere de ellos que los neutrinos, pese a que no se les atribuía antes, sí tienen masa. El modelo estándar de la física de partículas, que ha cosechado éxitos extraordinarios, debe modificarse a fin de acomodar los neutrinos con masa.

que tales mezclas de neutrinos oscilarían entre un sabor y otro durante el viaje del Sol a la Tierra.

El proyecto Super-Kamiokande, una cooperación internacional, ofreció una prueba especialmente convincente de la oscilación de los neutrinos en 1998: encontró que los neutrinos muónicos producidos en la alta atmósfera por los rayos cósmicos desaparecían con una probabilidad que dependía de la distancia que hubiesen recorrido. Esta desaparición de neutrinos se explicaba de maravilla con las oscilaciones neutrínicas, en este caso con las oscilaciones de los neutrinos muónicos, que probablemente se convierten en neutrinos tau. Super-Kamiokande detecta los neutrinos muónicos con facilidad a las energías de los rayos cósmicos, pero los tau, en general, se le escapan.

Un proceso similar podría explicar el déficit de neutrinos solares. Según un modelo, los neutrinos oscilarían durante los ocho minutos de su viaje a través del espacio vacío entre el Sol y la Tierra. En otro modelo, la oscilación se amplificaría durante los dos primeros



CORTESIA DE SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY

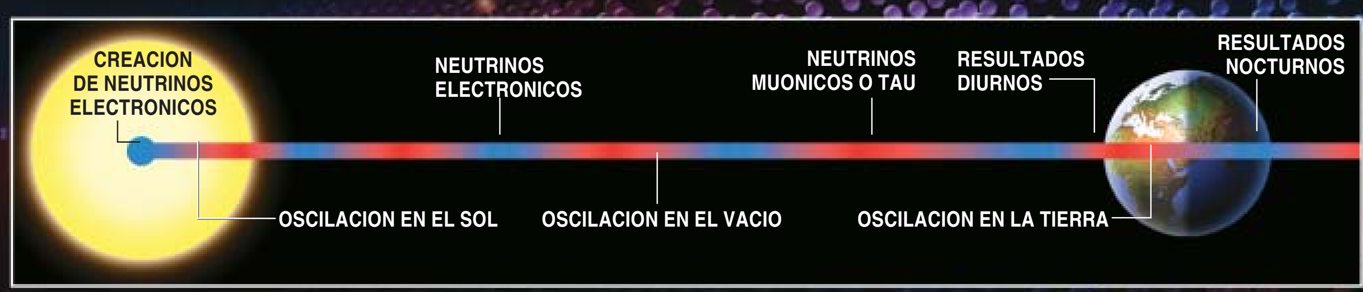
ESTOS TUBOS FOTOMULTIPLICADORES —más de 9500—, instalados en una esfera geodésica de 18 metros de diámetro, son los ojos del Observatorio de Neutrinos de Sudbury. Rodean y observan otra esfera, acrílica, de 12 metros de diámetro, que contiene 1000 toneladas de agua pesada. Cada tubo detecta un solo fotón de luz. El conjunto está suspendido en agua ordinaria. Los materiales que forman el detector deben hallarse exentos de trazas de elementos radiactivos naturales, para evitar que los tubos se sobrecarguen con falsos recuentos de neutrinos solares.

LA DETECCION DE LOS NEUTRINOS VARIABLES

ASI OSCILAN LOS NEUTRINOS

Un neutrino electrónico (*izquierda*) es en realidad una superposición de los neutrinos de tipo 1 y de tipo 2, con sus números cuánticos en fase. Como las ondas de tipo 1 y de tipo 2 tienen distintas longitudes de onda, tras recorrer una cierta distancia se habrán desfasado; el resultado será un neutrino muónico o un neutrino tau (*en medio*). Nuevas oscilaciones volverán a convertir el neutrino en un neutrino electrónico (*derecha*).

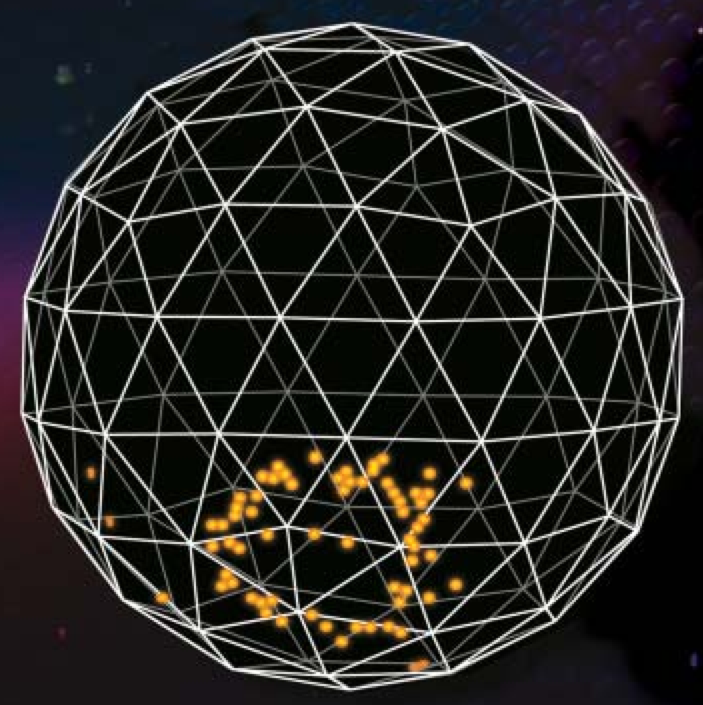




DONDE OSCILAN LOS NEUTRINOS

Los neutrinos electrónicos producidos en el centro del Sol oscilarán mientras aún estén dentro del Sol o, una vez hayan emergido, durante su viaje de ocho minutos hacia la Tierra. La magnitud de la oscilación dependerá de ciertos detalles (las diferencias de masas y los grados de mezcla intrínsecos de los neutrinos de tipo 1 y de tipo 2). Puede haber también nuevas oscilaciones dentro de la Tierra; se manifiestan mediante diferencias entre los resultados diurnos y los nocturnos.

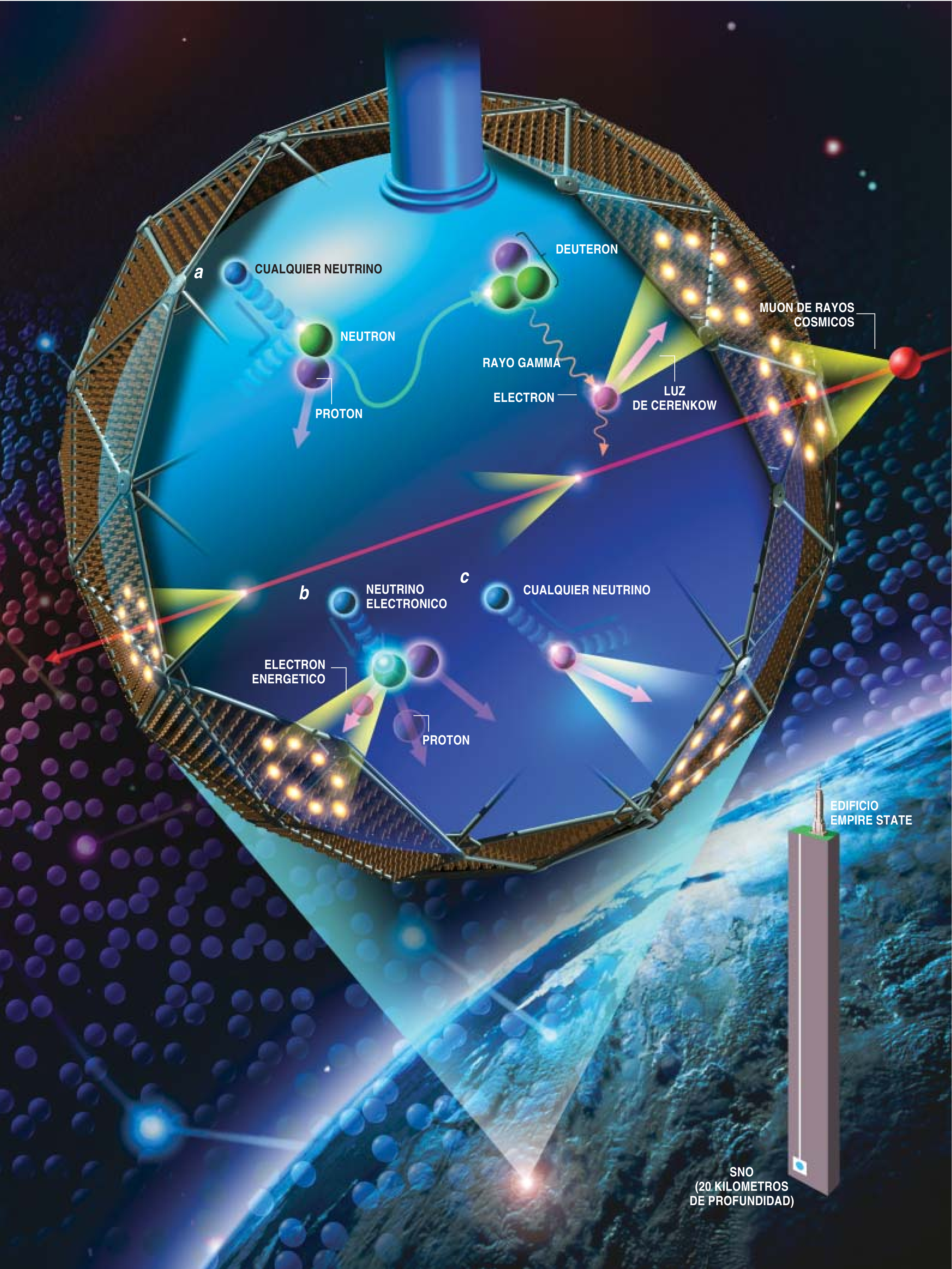
DATOS REALES DE UN POSIBLE EPISODIO NEUTRINICO



SLIM FILMS

ASI DETECTA EL SNO LOS NEUTRINOS

La detección de un neutrino en el Observatorio de Neutrinos de Sudbury (o SNO) (*página opuesta*) consiste en que se registre un anillo característico de luz de Cerenkov, emitida por un electrón de gran velocidad. El neutrino produce el electrón energético en el agua pesada del SNO (*esfera azul grande*) de tres maneras. En una rotura de deuterón (*a*) el neutrino (*azul*) escinde un núcleo de deuterio en el protón (*púrpura*) y el neutrón (*verde*) que lo componen. El neutrón se combinará con otro deuterón y se desprenderá un rayo gamma (*línea ondulada*), que a su vez liberará un electrón (*rosa*) cuya luz de Cerenkov (*amarilla*) se detectará. En la absorción de neutrinos (*b*) un neutrón absorbe un neutrino y, con ello, se convierte en un protón y un electrón dotados de energía. Sólo los neutrinos electrónicos pueden ser absorbidos de esta manera. Menos a menudo, el neutrino puede chocar directamente con un electrón (*c*). Los muones de los rayos cósmicos (*rojo*) se distinguen de los neutrinos por la cantidad de luz de Cerenkov que producen y por dónde la producen —tanto fuera como dentro del detector—. El número de muones se reduce a niveles manejables al instalar el detector a dos kilómetros de profundidad.



a
CUALQUIER NEUTRINO
NEUTRON
PROTON
DEUTERON
RAYO GAMMA
ELECTRON
LUZ
DE CERENKOW
MUON DE RAYOS
COSMICOS
b
NEUTRINO
ELECTRONICO
c
CUALQUIER NEUTRINO
ELECTRON
ENERGETICO
PROTON
EDIFICIO
EMPIRE STATE
SNO
(20 KILOMETROS
DE PROFUNDIDAD)

segundos de viaje, dentro del propio Sol, en razón de la peculiar interacción respectiva de cada sabor de neutrino con la materia. Cada modelo requiere un intervalo específico de cada parámetro neutrínico, a saber, las diferencias de masas entre los neutrinos y la cantidad intrínseca de mezcla de sabores. A pesar de los indicios aportados por el Super-Kamiokande y otras instalaciones, habría una cierta posibilidad de que los neutrinos no estuvieran desapareciendo a causa de las oscilaciones, sino por algún otro proceso. Hasta el año 2001 no se contó con una prueba *directa* de la oscilación de los neutrinos solares: no había una detección de los propios neutrinos solares transformados.

El observatorio

El Observatorio de Neutrinos de Sudbury se diseñó para que hallase esa prueba directa. Detecta los neutrinos aprovechando varias de las diferentes interacciones que experimentan con las 1000 toneladas de agua pesada que lo componen. Una de esas reacciones cuenta nada más neutrinos electrónicos; las otras, todos los sabores, sin distinguir entre ellos. Si los neutrinos solares que llegan a la Tierra son sólo electrónicos —y, por tanto, no ha ocurrido ninguna transformación de sabores—, el recuento de neutrinos de todos los sabores coincidirá con la anotación de neutrinos electrónicos. Por otro lado, si la cuenta de todos los sabores fuera muy superior a la de los neutrinos electrónicos, se probaría que los neutrinos del Sol cambian de sabor.

La clave de la capacidad del SNO para contar tanto los neutrinos electrónicos sólo como los de todos los sabores estriba en los núcleos de deuterio del agua pesada, o deuterones. El neutrón de un deuterón produce dos reacciones neutrínicas distintas: la absorción, en la que un neutrino electrónico es absorbido por un neutrón, con la creación de un electrón, y la rotura del deuterón, en la que un núcleo de deuterio se fragmenta y libera su neutrón. Sólo los neutrinos electrónicos sufren absorciones; en cambio, rompen deuterones neutrinos de cualquier sabor. Una tercera reacción detectada por el SNO, la colisión de electrones con neutrinos, también vale para contar neutrinos distintos de los electrónicos, pero es mucho menos sensible a los neutrinos muónicos y tau que la reacción de rotura del deuterón.

El SNO no fue el primer experimento que usó agua pesada. En el decenio de 1960 T. J. Jenkins y F. W. Dix, de la Universidad Case de la Reserva del Oeste, recurrieron al agua pesada en un muy temprano intento de observar los neutrinos del Sol. Emplearon unos 2000 litros de agua pesada, pero no los colocaron en el subsuelo: los efectos de los rayos cósmicos ahogaron las señales de los neutrinos solares. En 1984 Herb Chen, de la Universidad de California en Irvine, propuso que se llevaran mil toneladas de agua pesada del reactor nuclear CANDU, canadiense, al fondo de la mina de níquel Creighton, de INCO Ltd., en Sudbury. Tenía profundidad suficiente como para posibilitar una clara medida tanto de la absorción como de la rotura de los deuterones

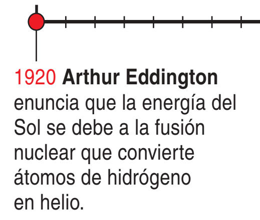
La propuesta de Chen condujo al establecimiento de la colaboración científica SNO y, finalmente, a la creación del detector SNO. Las 1000 toneladas de agua pesada se contienen en una vasija acrílica transparente de 12 metros de diámetro. Las escrutan más de 9500 tubos fotomultiplicadores, dispuestos sobre una esfera geodésica de 18 metros de diámetro. Cada tubo es capaz de detectar un único fotón de luz. Toda la estructura está sumergida en agua ordinaria ultrapura que llena una cavidad abierta en la roca, dos kilómetros por debajo de la superficie de la Tierra.

Los neutrinos solares se pueden observar a gran profundidad gracias a la suma debilidad de su interacción con la materia. Durante el día, los neutrinos siguen sin trabas un recorrido descendente hasta el SNO a través de dos kilómetros de roca. Tampoco les afectan los miles de kilómetros que recorren por la noche a través de la Tierra. Un acoplamiento tan débil los hace interesantes desde la perspectiva de la astrofísica solar. La mayor parte de la energía creada en el centro del Sol tarda millones de años en alcanzar la superficie de la estrella y salir a su exterior convertida en la luz solar. Por el contrario, los neutrinos emergen a los dos segundos; nos llegan directamente desde el punto en que se crea la energía solar.

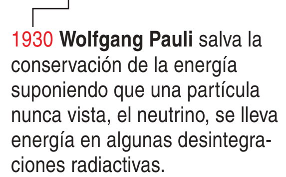
Dado que ni todo el Sol, ni toda la Tierra son capaces de impedir el paso de los neutrinos, el captarlos con un detector que pesa sólo 1000 toneladas constituye un gran reto. Pero aunque la vasta mayoría de neutrinos que entran en el SNO lo atraviesan sin más consecuencias, en muy raras ocasiones uno —sólo por casualidad— colisionará con un electrón o un núcleo atómico y depositará energía bastante como para que

OCHO DECENIOS DE SOL Y NEUTRINOS

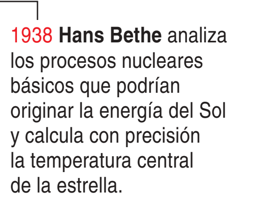
SE HA TARDADO CASI UN SIGLO en conocer con seguridad el mecanismo solar de generación de energía. Mientras, los neutrinos han pasado de ser meras hipótesis a convertirse en instrumentos experimentales de la mayor importancia. Sus oscilaciones señalan que en las décadas venideras se descubrirán nuevos aspectos de la física fundamental.



1920 **Arthur Eddington** enuncia que la energía del Sol se debe a la fusión nuclear que convierte átomos de hidrógeno en helio.



1930 **Wolfgang Pauli** salva la conservación de la energía suponiendo que una partícula nunca vista, el neutrino, se lleva energía en algunas desintegraciones radiactivas.



1938 **Hans Bethe** analiza los procesos nucleares básicos que podrían originar la energía del Sol y calcula con precisión la temperatura central de la estrella.

1956 **Frederick Reines** y **Clyde Cowan** detectaron por primera vez el neutrino; se valieron del reactor nuclear del río Savannah.

quepa observar el episodio. Con un flujo suficiente de neutrinos, puede incluso compensarse la rareza de estas interacciones. Por fortuna, el Sol produce enormes cantidades de neutrinos —cinco millones de neutrinos de alta energía atraviesan cada centímetro cuadrado de la Tierra por segundo—, lo que conduce a unos 10 episodios, o interacciones neutrínicas, en las 1000 toneladas del agua pesada del SNO cada día. Los tres tipos de reacciones de neutrinos que ocurren en el SNO generan electrones de gran energía; se los detecta gracias a su producción de luz de Cerenkov, un cono de luz emitido como una onda de choque por la rápida partícula.

Este pequeño número de episodios neutrínicos debe distinguirse, sin embargo, de los destellos de luz de Cerenkov causados por otras partículas. En particular, en la alta atmósfera se crean continuamente muones de rayos cósmicos; cuando entran en el detector pueden producir suficiente luz de Cerenkov como para iluminar cada tubo fotomultiplicador. Los kilómetros de roca interpuestos entre la superficie y el SNO reducen el diluvio de muones de los rayos cósmicos a un mínimo goteo de tres por hora. Y aunque tres muones por hora resulte un ritmo mucho mayor que las 10 interacciones de neutrinos por día, es fácil distinguirlos de los episodios neutrínicos por la luz de Cerenkov que producen en el agua ordinaria exterior al detector.

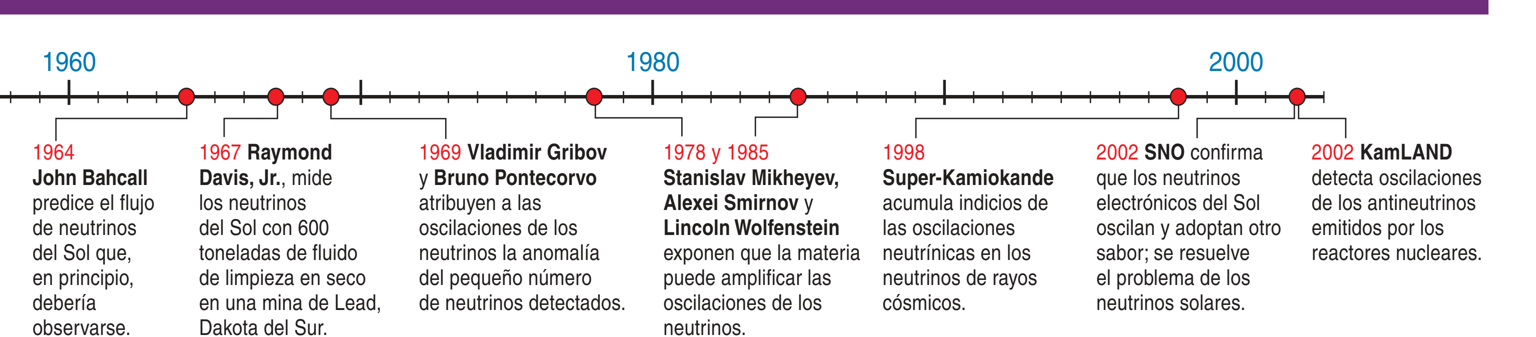
Otra causa de falsos recuentos de neutrinos es la radiactividad intrínseca de los propios materiales del detector. Todo lo que hay dentro del detector —sea la propia agua pesada, la vasija acrílica que la contiene o el vidrio y el acero de los tubos fotomultiplicadores y la estructura de soporte— contiene trazas de elementos radiactivos naturales. El aire de la mina encierra gas radón radiactivo. Cada vez que un núcleo de estos elementos radiactivos se desintegra en el interior del detector del SNO, desprende un electrón de energía elevada o un rayo gamma; por último, se genera luz de Cerenkov que imita la señal de un neutrino. El agua y los otros materiales utilizados en el SNO se han purificado a fin de eliminar la mayor parte de los contaminantes radiactivos (o se han seleccionado de manera que sean naturalmente puros), pero bastan unas partes entre mil millones para ahogar con cuentas falsas las verdaderas señales de los neutrinos.

La tarea planteada al SNO es, por tanto, muy compleja: ha de contar sucesos neutrínicos, determinar cuántos se deben a cada una de las tres reacciones y evaluar cuántos de los aparentes neutrinos no representan en realidad alguna otra cosa, una contaminación radiactiva quizás. Errores pequeños, de apenas unas partes en cien, en cualquiera de las etapas de análisis, dejaría sin sentido la comparación que efectúa el SNO del flujo de neutrinos electrónicos con el flujo neutrínico total. En los 306 días de funcionamiento, de noviembre de 1999 a mayo de 2001, registró casi quinientos millones de sucesos. Cuando se acabó la reducción de datos, sólo quedaban 2928 como posibles episodios neutrínicos.

Al SNO no le es posible determinar de manera inequívoca si determinado suceso que en principio pueda contar como episodio neutrínico fue el resultado de un tipo de reacción o de otro. Un suceso como el mostrado en el recuadro “La detección de los neutrinos variables” podría deberse tanto a la rotura de un deuterón como a una absorción de neutrino. Afortunadamente, cuando examinamos muchos episodios aparecen las diferencias entre las reacciones. Por ejemplo, la rotura del deuterón —la escisión de un núcleo de deuterio del agua pesada— genera siempre un rayo gamma de la misma energía, mientras que los electrones emitidos por la absorción de un neutrino o por su colisión con un electrón exhiben un amplio espectro de energías. Además, las colisiones con electrones producen electrones que se alejan del Sol, mientras que la luz de Cerenkov de la rotura de un deuterón apunta en cualquier dirección. Finalmente, también son diferentes los lugares donde suceden las reacciones: las colisiones con electrones, por ejemplo, ocurren por igual en la capa exterior de agua ligera que en el agua pesada; las otras reacciones, no. Una vez conocidos estos detalles, los investigadores del SNO pueden determinar estadísticamente cuántos de los sucesos observados se han de asignar a cada reacción.

Ese conocimiento de los detalles se obtuvo con mediciones que, en sí mismas, fueron ya auténticos y completos experimentos de física nuclear. Para establecer cómo debía medirse la energía a partir de la luz de Cerenkov, se introdujeron, en el interior del detector, fuentes radiactivas de energías conocidas. Para medir la propagación de la luz de Cerenkov por el detector y su reflexión en distintos medios (el agua, el acrílico, los tubos fotomultiplicadores), se usó luz láser de longitud de onda variable. Los efectos de la contaminación radiactiva se evaluaron mediante experimentos similares;

BRYAN CHRISTIE DESIGN



OTROS EXPERIMENTOS SOBRE LOS NEUTRINOS

HOMESTAKE: Detector de neutrinos solares sito en la mina de oro Homestake, en Lead, Dakota del Sur. El experimento original, con cloro, empezó en 1966; usaba 600 toneladas de fluido de limpieza en seco. En 1996 se complementó con un experimento radioquímico de yoduro de sodio, que empleaba 100 toneladas de yodo.

KAMIOKA: Alberga el Super-Kamiokande, un detector de 50.000 toneladas de agua ligera que estudia los rayos cósmicos y los neutrinos solares, así como los neutrinos muónicos emitidos desde la instalación KEK, a 250 kilómetros de distancia (el experimento K2K). También alberga KamLAND, un detector menor (1000 toneladas de líquido de centelleo que emite luz cuando lo atraviesa una partícula cargada) que computa los antineutrinos electrónicos emitidos por todos los reactores nucleares del entorno (los de Corea del Sur y Japón).

SAGE (Russian-American Gallium Solar Neutrino Experiment): Situado en Baksan, en las montañas del Cáucaso. Utiliza 50 toneladas de galio, sustancia que puede captar neutrinos de baja energía producidos por las reacciones de fusión protón-protón del Sol.

GRAN SASSO: El mayor laboratorio subterráneo del mundo. Fue excavado bajo las montañas del Gran Sasso, a unos 150 kilómetros al este de Roma. Entre los dispositivos que investigan los neutrinos solares se encuentran el Gallex/GNO, activo desde 1991, que contiene 30 toneladas de galio en forma de tricloruro de galio acuoso, y el Borexino, una esfera de 300 toneladas de centelleador, observada por 2200 fotomultiplicadores.

MINIBOONE (Booster Neutrino Experiment): Está instalado en el Fermilab, en Illinois. Haces de neutrinos y antineutrinos muónicos recorren 500 metros de suelo antes de que se los detecte en un tanque de 800 toneladas de aceite mineral. Su objeto es comprobar un controvertido resultado anunciado por el experimento LSND del Laboratorio Nacional de Los Alamos, efectuado en 1995. Empezó a recoger datos en septiembre de 2002.

MINOS: Dirigirá haces de neutrinos desde el Fermilab hacia el detector de Soudan, a 735 kilómetros de distancia, en Minnesota. El detector se compone de 5400 toneladas de hierro rodeadas por detectores de partículas plásticos. Está proyectado que empiece a tomar datos en 2005.

en concreto, se calibró radiológicamente el agua con técnicas nuevas, concebidas para el SNO.

Una vez efectuado el análisis estadístico, el conjunto definitivo de datos atribuía 576 sucesos a la rotura de deuterones, 1967 a la absorción de neutrinos y 263 a las colisiones con electrones. La radiactividad y otros ruidos de fondo causaron los 122 restantes. A partir de estos números, hay que calcular cuántos neutrinos atraviesan el SNO, basándose en las pequeñas probabilidades de que un neutrino cualquiera rompa un deuterón, sea absorbido o colisione con un electrón. Esos cálculos arrojan que los 1967 sucesos observados de absorción de neutrinos representan 1,75 millones de neutrinos electrónicos que atraviesan cada centímetro cuadrado del detector SNO por segundo. Se trata sólo del 35 por ciento del flujo de neutrinos predicho por los modelos solares. Así, en primer lugar, el SNO confirma lo que han visto otros experimentos de neutrinos solares: el número de neutrinos electrónicos que llega del Sol es mucho menor que el predicho por los modelos solares.

Sin embargo, el quid está en si el número de neutrinos electrónicos que llegan del Sol es significativamente menor que el número de neutrinos de todos los sabores. Resulta que los 576 sucesos asignados a la rotura de deuterones representan un flujo total de neutrinos de 5,09 millones por centímetro cuadrado por segundo, muy superior a los 1,75 millones de neutrinos electrónicos medidos según la absorción neutrínica.

Los autores

ARTHUR B. MCDONALD, JOSHUA R. KLEIN y DAVID L. WARK participan en las investigaciones del Observatorio de Neutrinos de Sudbury (SNO).

Estos números se determinan con gran precisión. Las diferencias entre ellos es más de cinco veces la incertidumbre experimental.

El excedente de neutrinos detectados por la rotura de deuterones significa que casi dos tercios del total de 5,09 millones de neutrinos que llegan del Sol son neutrinos muónicos o tau. Las reacciones de fusión del Sol sólo engendran neutrinos electrónicos; por tanto, algunos de ellos han de transformarse durante su viaje a la Tierra. Así pues, el SNO ha demostrado directamente que los neutrinos no se atienen al simple esquema, propio del modelo estándar, de los tres sabores sin masa que no se mezclan. En 20 años de intentos, sólo el Super-Kamiokande y el SNO han demostrado que hay propiedades de las partículas fundamentales que el modelo estándar no abarca. Haber observado la transformación de los sabores de los neutrinos supone una confirmación experimental directa de que aún quedan cosas que descubrir acerca del universo microscópico.

Pero, ¿qué ocurre con el problema de los neutrinos solares? O dicho de otra manera: el descubrimiento de que los neutrinos electrónicos se transforman en otro sabor, ¿explica del todo el déficit observado durante los pasados 30 años? La respuesta es afirmativa: los deducidos 5,09 millones de neutrinos concuerdan muy bien con las predicciones de los modelos solares. Podemos ahora afirmar que entendemos realmente cómo el Sol genera su energía. Tras un rodeo de treinta años, en el que hemos encontrado que el Sol podía decirnos algo nuevo acerca de los neutrinos, podemos por fin retornar al objetivo original de Davis y valernos de los neutrinos para conocer el Sol. El estudio de los neutrinos solares, por ejemplo, podría determinar qué parte de la energía del Sol se produce por fusión nuclear directa de átomos de hidrógeno y qué parte está catalizada por átomos de carbono.

El futuro

Las implicaciones del descubrimiento del SNO van incluso más allá. Si los neutrinos cambian de sabor por medio de oscilaciones, no podrán tener masa nula. Después de los fotones, los neutrinos son la segunda partícula conocida más numerosa del universo; ello significa que incluso una pequeña masa podría tener una gran importancia cosmológica. Los experimentos que estudian las oscilaciones de neutrinos, como el SNO y el Super-Kamiokande, miden sólo diferencias de masa, no masas. Sin embargo, mostrar que las diferencias de masa no valen cero demuestra que al menos alguna de las masas no es nula. La combinación de las medidas de las oscilaciones relativas a las diferencias de masa con los límites superiores, impuestos por otros experimentos, de la masa absoluta del neutrino electrónico arroja, según las hipótesis que se añadan, un abanico de posibles contribuciones totales de los neutrinos a la masa del universo que abarca del 0,3 al 21 por ciento de la densidad crítica correspondiente a un universo plano (los datos cosmológicos indican que el universo es plano). Estas cantidades no son despreciables (el gas, el polvo y las estrellas aportan un 4 por ciento), pero no bastan para explicar toda la materia que parece haber en el universo. Puesto que los neutrinos eran la última entre las partículas conocidas de las que podía esperarse que constituyesen la materia oscura, debe existir alguna partícula o partículas ignotas todavía por la ciencia; cuya densidad, además, tendrá que ser muy superior a la de cualquiera de las que *sí* conocemos.

El SNO también ha estado buscando pruebas directas de los efectos de la materia sobre las oscilaciones de neutrinos. El viaje a través del Sol puede aumentar la probabilidad de las oscilaciones. Si es así, el paso de los neutrinos a través de miles de kilómetros de Tierra podría provocar una ligera inversión del proceso; la emisión solar de neutrinos electrónicos brillaría más durante la noche que durante el día. Según los datos del SNO, de noche crece un poco el número de los neutrinos electrónicos, pero hasta ahora la medición no permite establecer su veracidad.

Los resultados que el SNO ha presentado señalan sólo un comienzo. En las observaciones citadas, hemos detectado los neutrones de los episodios de rotura de deuterones mediante la observación de su captura por otros átomos de deuterio, un proceso poco eficiente que no produce mucha luz. En mayo de 2001 se añadieron dos toneladas de cloruro de sodio muy purificado al agua pesada. Los núcleos de cloro capturan los neutrones con una eficiencia mucho mayor que los de deuterio; se producen sucesos que generan una luz más intensa y a los que cuesta menos distinguir del fondo. Así, el SNO hará una medición separada y más precisa del ritmo de ruptura de deuterones para confirmar los primeros resultados. La dirección del SNO también ha construido un conjunto de detectores ultralimpios, los contadores proporcionales, que se distribuirán por el agua pesada en julio de 2003; detectarán los neutrones directamente. Construir estos detectores ha presentado dificultades técnicas de primer orden; deben tener un nivel de ruido radiactivo intrínseco bajísimo (alrededor de una cuenta por metro de detector y año). Comprobarán los anteriores resultados del SNO mediante un experimento distinto.

El SNO tiene unas posibilidades únicas, pero no está sólo en el terreno de juego. En diciembre de 2002 se dieron a conocer los primeros resultados de un nuevo experimento japonés-norteamericano, el experimento KamLAND. El detector se encuentra en el mismo lugar que el Super-Kamiokande, pero estudia los antineutrinos electrónicos producidos por los reactores nucleares de la región (los reactores japoneses y coreanos). Así como las oscilaciones neutrínicas amplificadas por la materia explican el cambio de sabor observado por el SNO, la teoría predice que estos antineutrinos deberán cambiar también de sabor en distancias de decenas o centenares de kilómetros. En efecto, el KamLAND ha captado una merma de los antineutrinos electrónicos; de ello se infiere que oscilan durante su camino desde los reactores nucleares hasta el detector. Los resultados del KamLAND implican diferencias de masas de neutrinos y parámetros de mezcla parecidos a los observados por el SNO.

Los futuros experimentos con neutrinos quizás escruten uno de los mayores misterios del cosmos: ¿por qué se compone de materia y no de antimateria? Andrei Sakharov señaló que, para obtener de una gran explosión de pura energía el actual universo dominado por la materia, se requería que las leyes de la física fuesen diferentes para las partículas y las antipartículas. La diferencia constituiría una violación de una simetría de la naturaleza, la simetría CP (de carga-paridad). Precisas medidas de ciertas desintegraciones de partículas han verificado que las leyes de la física violan la simetría CP. El problema es que la violación de CP observada hasta ahora no basta para explicar la cantidad de materia que nos rodea, de manera que algunos fenómenos que aún no hemos observado deben esconder una mayor violación de CP. Y un posible escondite son las oscilaciones de neutrinos.

La observación de oscilaciones neutrínicas con violación de CP constaría de diversas etapas. En primer lugar habría que observar la aparición de neutrinos electrónicos en haces intensos de neutrinos muónicos. En segundo lugar, se deberían construir aceleradores de más alta intensidad, que produjeran haces de neutrinos tan intensos y puros, que sus oscilaciones se captasen en detectores de diversos continentes o de los antípodas. La investigación de ciertos procesos radiactivos raros, las desintegraciones beta dobles sin emisión de neutrinos, proporcionarán información adicional acerca de las masas de los neutrinos y de la violación de CP.

Bibliografía complementaria

THE ORIGIN OF NEUTRINO MASS. Hitoshi Murayama en *Physics World*, vol. 15, n.º 5, páginas 35-39; mayo 2002.

THE ASYMMETRY BETWEEN MATTER AND ANTIMATTER. Helen R. Quinn en *Physics Today*, vol. 56, n.º 2, páginas 30-35; febrero 2003.

FUTURO DEL ETNA

El mayor y más activo volcán de Europa se está volviendo peligroso. Para fortuna de quienes viven en su cercanía, la transformación se produce con lentitud

Tom Pfeiffer



1. LA VIOLENTA ERUPCION de una boca eruptiva lateral del Etna lanzó lava a una altura de cientos de metros el 28 de julio de 2001. A sólo 30 kilómetros de distancia se encuentra Catania, la segunda ciudad de Sicilia.

En octubre pasado, unos mil sicilianos huyeron de sus casas cuando el Etna despertó una vez más. Lanzó roca fundida a una altura de más de 500 metros, mandó ríos de lava ladera abajo por sus flancos norte y sur. Acompañaron la erupción cientos de terremotos de hasta 4,3 puntos en la escala de Richter. Mientras una enorme nube de humo y ceniza atravesaba el Mediterráneo, en Linguaglossa ("lenguas de lava") rogaban para que se detuvieran las coladas lávicas. Sacaron en procesión la imagen del santo patrón por las calles del pueblo.

Tal vez gracias a la intervención divina no hubo heridos ni los daños fueron extensos. Pero el episodio desató los nervios; se asemejaba mucho a una errática erupción en el flanco sur del volcán, ocurrida durante el verano de 2001, que destruyó partes de un establecimiento turístico y amenazó al pueblo de Nicolosi. Una parte de las lavas emitidas durante ambos sucesos fueron de un tipo poco frecuente, producido por última vez en grandes volúmenes en ese lugar hará unos 15.000 años. En esa época, una serie de erupciones catastróficas destruyeron uno de los edificios volcánicos que precedieron al Etna actual.

Los sicilianos que viven cerca del Etna lo consideran desde hace mucho tiempo un vecino inquieto pero hasta cierto punto amistoso. Aunque su actividad es persistente, no ha tenido una gran erupción explosiva —como la devastadora de 1980 del Monte Santa Elena, en el Estado de Washington— desde hace cientos de años. Pero ahora los investigadores que estudian el Etna han encontrado pruebas de que el peligro de actividad volcánica crece de un modo alarmante. Es poco probable que explote en un futuro próximo como lo hizo el Monte Santa Elena; sin embargo, quizá sean cada vez más comunes las erupciones violentas, parecidas a las de 2001 y 2002.

Montaña de fuego

El nombre "Etna" deriva de una vieja raíz indogermánica que significa "quemado" o "ardiendo". Un amplio conjunto de narraciones y leyendas dan testimonio de 3000 años de actividad del volcán, pero sólo se dispone de informaciones fiables desde el siglo XVII. La mayor parte de los relatos se limitan a las erupciones particularmente violentas, tales como las ocurridas en 122 a. C. y 1169, 1329, 1536 y 1669 d. C. Durante la erupción de 1669, una fisura de varios kilómetros dejó escapar una inmensa colada de lava cerca de Nicolosi. Recorrió unos 15 kilómetros y enterró una parte de la ciudad de Catania antes de adentrarse en el mar.

Con un volumen de casi 350 kilómetros cúbicos y una superficie de aproximadamente 1200 kilómetros cuadrados, el Etna es el mayor de los volcanes de Europa (*véase el recuadro* "Perfil de un volcán"). Su pico, de unos 3340 metros de altura, está a menudo cubierto de nieve; sólo los 2000 metros superiores están formados de material volcánico. La montaña descansa sobre una base de roca sedimentaria, cuya edad va del Cretáceo Superior (hace aproximadamente 100 millones de años) hasta el Cuaternario (el período geológico actual). Bloques de este material quedan en ocasiones envueltos por el magma, la roca fundida en ascenso, y son proyectados a la superficie. Las erupciones de 2001 y 2002 lanzaron numerosos bloques de arenisca blanca. Este tipo de fenómeno ocurre cada vez que el magma ha de abrir nuevos caminos en su ascenso, como suele suceder en las erupciones laterales (las que se producen en los flancos del volcán).

El volcán tiene una edad de más de 500.000 años. Todavía se conservan en las cercanas regiones costeras vestigios de sus primeras erupciones. Adoptan la forma de lavas almohadilladas; afloran bajo el



CORBIS

agua y se asemejan a enormes almohadas. Al principio, en una depresión, sita donde ahora se encuentra el Etna, creció un volcán en escudo; obedece esa denominación a su aspecto. Hoy, un cono mucho más escarpado descansa sobre el antiguo volcán en escudo. Consta de al menos cinco generaciones de edificios volcánicos, que se han acumulado durante los últimos 100.000 a 200.000 años, cada uno sobre los restos de su predecesor erosionado o en parte desmoronado. El cono actual se ha construido en los últimos 5000 u 8000 años. Entre las características especiales del Etna se incluyen los centenares de pequeños conos de cenizas diseminados en sus laderas. Cada uno señala una salida lateral del magma. El Etna, uno de los volcanes más productivos del planeta, ha arrojado unos 30 millones de metros cúbicos de material ígneo cada año desde 1970, con una tasa eruptiva máxima de 300 metros cúbicos por segundo.

El Etna es también uno de los volcanes más enigmáticos. ¿Por qué ha ascendido la lava a la superficie en este punto concreto y por qué continúa haciéndolo en cantidades tan grandes? Las respuestas deberían hallarse en la teoría de la tectónica de placas, según la cual la corteza externa de la Tierra se compone de una docena de grandes placas, cada una con un espesor de entre 5 y 150 kilómetros. Las placas abarcan la corteza del planeta y la parte superior del manto. Como trozos de hielo que flotan en el océano, se mueven a la deriva de forma independiente, a veces alejándose entre sí y otras acercándose y chocando. Los 530 volcanes activos del mundo se dividen en tres tipos principales, según estén situados en el borde o en el interior de estas placas.

Tipos de volcán

El primer tipo, y el más numeroso, se encuentra a lo largo de las zonas de rift, donde dos placas se separan. Los mejores ejemplos son las largas cordilleras mesooceánicas. Separan las placas a lo largo de fracturas fuerzas que actúan por debajo de las propias placas. La escisión propicia que otro material más caliente ascienda desde el manto subyacente; se funde mientras asciende, lo que genera basalto (el tipo más común de magma), que contiene grandes cantidades de hierro y magnesio. El material basáltico fundido rellena el espacio creado por las placas que se separan, añadiendo así continuamente nueva corteza oceánica.

El segundo tipo está situado a lo largo de las zonas de subducción, donde dos placas convergen. Por lo general, una placa oceánica más fría y pesada se sumerge bajo una placa continental. El proceso que conduce a la formación del magma en este medio es completamente diferente: el agua y otros fluidos arrastrados con la placa que se hunde son liberados bajo una presión y una temperatura crecientes, sobre todo a profundidades de unos 100 kilómetros. Estos fluidos ascienden y penetran en la cuña de manto caliente de encima y causan el descenso de la temperatura de fusión de la roca. Los magmas resultantes, más viscosos y ricos en gases que los fundidos de las zonas de rift, contienen menos hierro y magnesio y más sílice y componentes volátiles (principalmente agua y dióxido de carbono).

Estos factores tienen como consecuencia que los volcanes de las zonas de subducción resulten mucho más peligrosos que los de las zonas de rift. Como el magma viscoso y más rico en gases no fluye con facilidad hasta la superficie, la



2. ESTA ERUPCION de una fuente de lava se produjo en el flanco sur del Etna el 30 de octubre de 2002.

TOM PFEIFFER

presión crece hasta que toda la roca fundida se expele de forma explosiva. La repentina liberación de los gases fragmenta el magma en proyectiles volcánicos: bombas (masas redondeadas de lava), lapilli (fragmentos de rocas o vidrio volcánico) y ceniza. Este tipo de volcanes forma unos característicos conos escarpados, compuestos de capas alternantes de depósitos sueltos de proyección aérea y coladas lávicas. Algunos de los ejemplos más conocidos de volcanes de zonas de subducción se sitúan a lo largo de las márgenes del océano Pacífico y en los arcos insulares. Este "anillo de fuego" incluye el Monte Santa Elena, el Unzen en el Japón y el Pinatubo en las Filipinas, todos los cuales han entrado en erupción en los treinta últimos años.

El tercer tipo de volcán se desarrolla de forma independiente de los movimientos de las placas tectónicas. Se encuentran sobre puntos calientes causados por las plumas del manto, unas corrientes de material inusualmente calientes que ascienden, por convección térmica, desde lo más profundo del manto terrestre. A medida que las plumas del manto se acercan a la superficie, la presión decreciente hace que produzcan materiales fundidos que

Resumen/*La evolución del Etna*

- El Etna, considerado un volcán pacífico, ha hecho temblar a la isla italiana de Sicilia en estos dos últimos años. Las coladas de las erupciones habidas en ese tiempo en los flancos del Etna han destruido estaciones turísticas y amenazado a los pueblos cercanos.
- Se cree que una parte de la roca fundida del Etna viene generada por la colisión de dos placas tectónicas. Si esta hipótesis es correcta, el volcán quizá se vuelva mucho más violento y explosivo con el tiempo.

perforan la corteza buscando una salida; se crea así una cadena de volcanes de punto caliente. La mayoría de los volcanes de punto caliente produce coladas lávicas muy fluidas que construyen unos volcanes en escudo grandes y achatados, como el Mauna Loa de Hawai.

En la encrucijada

El Etna, sin embargo, no puede asignarse a ninguna de estas tres categorías principales de volcanes. Está situado en un área geológica compleja, que debe su forma actual a procesos tectónicos que han permanecido activos durante los últimos 50 a 60 millones de años. Una cuenca oceánica anterior existente entre Eurasia y el continente africano —que se desplazaba hacia el norte— fue absorbida en gran parte por la placa eurasiática. Hace unos 100 millones de años, dos placas de menor tamaño, Iberia y Adria, se desprendieron de las placas eurasiática y africana debido a las enormes presiones de desgarre relacionadas con la separación de América del Norte de Eurasia (y con la apertura del océano Atlántico).

Cinturones montañosos se levantaron a lo largo de los frentes donde colisionaban las placas. Los Apeninos de Italia se crearon al toparse las placas ibérica y adriática. Durante este proceso, la península italiana giró en sentido contrario a las agujas del reloj 120 grados; alcanzó así su posición actual. Hoy, el Etna está situado muy cerca del punto de unión de las placas africana, eurasiática y adriática. Bloques independientes de estas placas se han superpuesto y soldado en Sicilia. Un número de importantes fallas tectónicas cruzan la zona en torno al volcán como resultado de tensiones regionales intensas del interior de la corteza. La más importante es la falla de Comiso-Messina, que parte la corteza entre Sicilia y la península de Italia.



3. NUBES DE CENIZAS en forma de hongo emergieron del flanco nordeste del Etna el 28 de octubre de 2002.

TOM PFEIFFER

Durante muchos años, se ha creído que explicaba el volcanismo del Etna el que estuviese situado en el cruce de estas fallas. La presencia de las fallas, sin embargo, sólo explica la capacidad del magma de alcanzar la superficie; no explica por qué el magma se produce. De acuerdo con la mayoría de las teorías, las fuerzas que prevalecen en la corteza siciliana son similares a las que operan en las zonas de rift, esfuerzos extensionales que generan adelgazamientos de la corteza y abombamientos por empuje ascendente del manto subyacente. Pero en Sicilia las placas africana y europea están en colisión; cabría, pues, esperar que las tensiones fueran más de compresión que de extensión. Además, sólo un 20 por ciento aproximadamente del magma emitido en el Etna tiene una composición parecida a la de un volcán de zona de rift.

A juzgar por el tipo de magma y las pautas de actividad, el Etna se asemeja más a los volcanes de punto caliente, a los hawaianos por ejemplo. Las teorías recientes sostienen que se ha desarrollado sobre una pluma activa del manto, pero no se ha hallado prueba alguna de la existencia de esa pluma. Hasta ahora, no se han podido explicar todas las características de este enigmático volcán. Así, el Etna es uno de los poquísimos volcanes en los que el magma está casi continuamente en ascenso. Sus períodos activos pueden tener una duración de años, o aun décadas, y son interrumpidos solamente por cortos intervalos de reposo. Esta pauta implica la existencia de dos cosas: la primera, un flujo constante de magma desde el manto hasta unas cámaras magmáticas profundas y someras situadas debajo del volcán; la segunda, un conducto abierto a través del cual el magma puede ascender. Ciertamente, los conductos entre las cámaras magmáticas del Etna y los cráteres sumitales parecen ser estructuras de larguísima vida. Las investigaciones sísmicas han demostrado que el magma ascendente produce poco ruido y parece moverse de manera suave, sin encontrar mayores obstáculos.

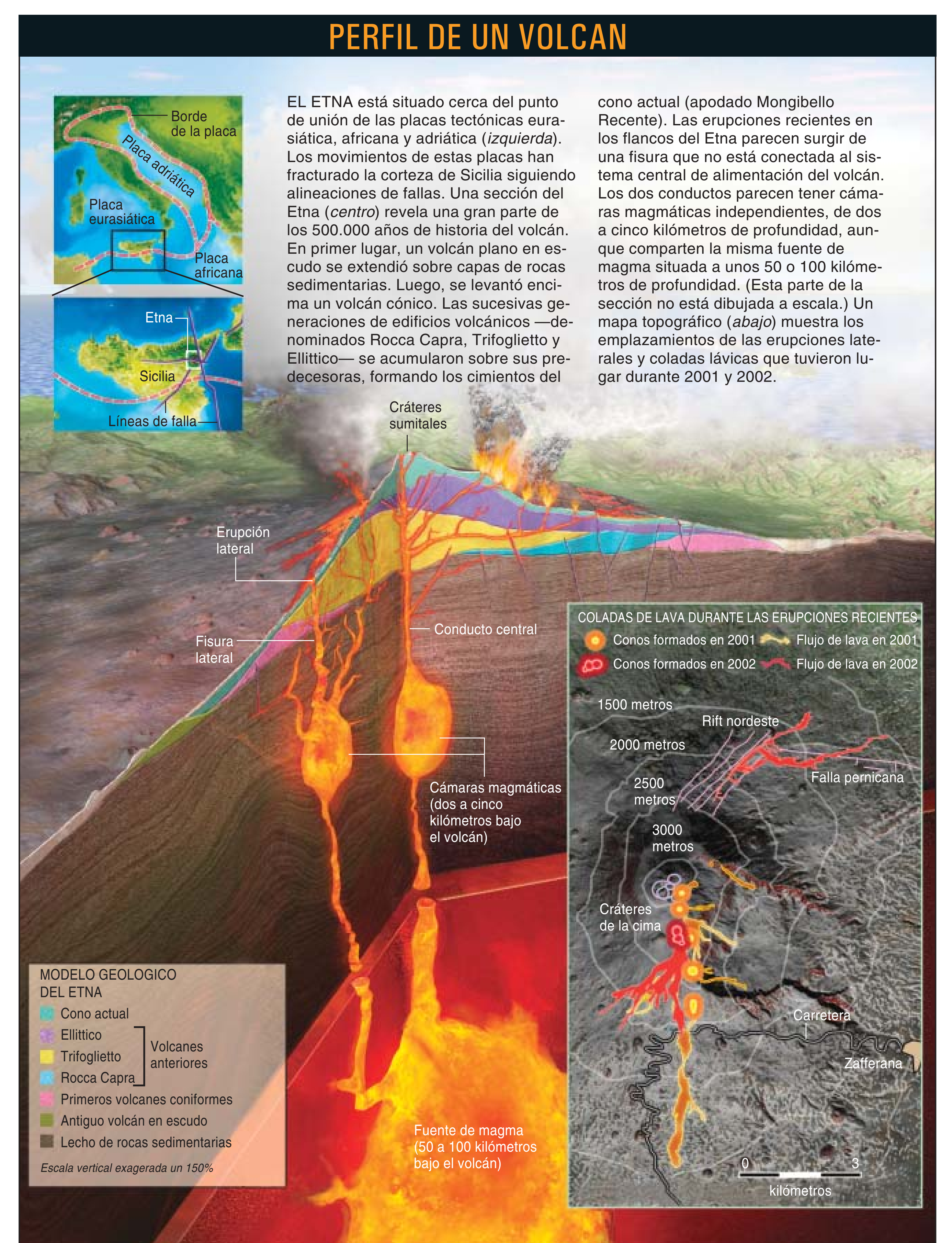
La clase de actividad que prevalece en el Etna depende del nivel de magma en el interior de sus conductos. La baja presión en la parte superior de la columna magmática permite que los gases disueltos (en su mayor parte agua y dióxido de

El autor

TOM PFEIFFER se halla adscrito al departamento de ciencias de la tierra de la Universidad de Ärhus, en Dinamarca. Ha investigado en el Observatorio Volcanológico de Hawai (en el volcán Kilauea) y en el Observatorio Vesubiano de Nápoles.

PERFIL DE UN VOLCAN

EL ETNA está situado cerca del punto de unión de las placas tectónicas eurasiática, africana y adriática (*izquierda*). Los movimientos de estas placas han fracturado la corteza de Sicilia siguiendo alineaciones de fallas. Una sección del Etna (*centro*) revela una gran parte de los 500.000 años de historia del volcán. En primer lugar, un volcán plano en escudo se extendió sobre capas de rocas sedimentarias. Luego, se levantó encima un volcán cónico. Las sucesivas generaciones de edificios volcánicos —denominados Rocca Capra, Trifoglietto y Ellittico— se acumularon sobre sus predecesoras, formando los cimientos del cono actual (apodado Mongibello Recente). Las erupciones recientes en los flancos del Etna parecen surgir de una fisura que no está conectada al sistema central de alimentación del volcán. Los dos conductos parecen tener cámaras magmáticas independientes, de dos a cinco kilómetros de profundidad, aunque comparten la misma fuente de magma situada a unos 50 o 100 kilómetros de profundidad. (Esta parte de la sección no está dibujada a escala.) Un mapa topográfico (*abajo*) muestra los emplazamientos de las erupciones laterales y coladas lávicas que tuvieron lugar durante 2001 y 2002.



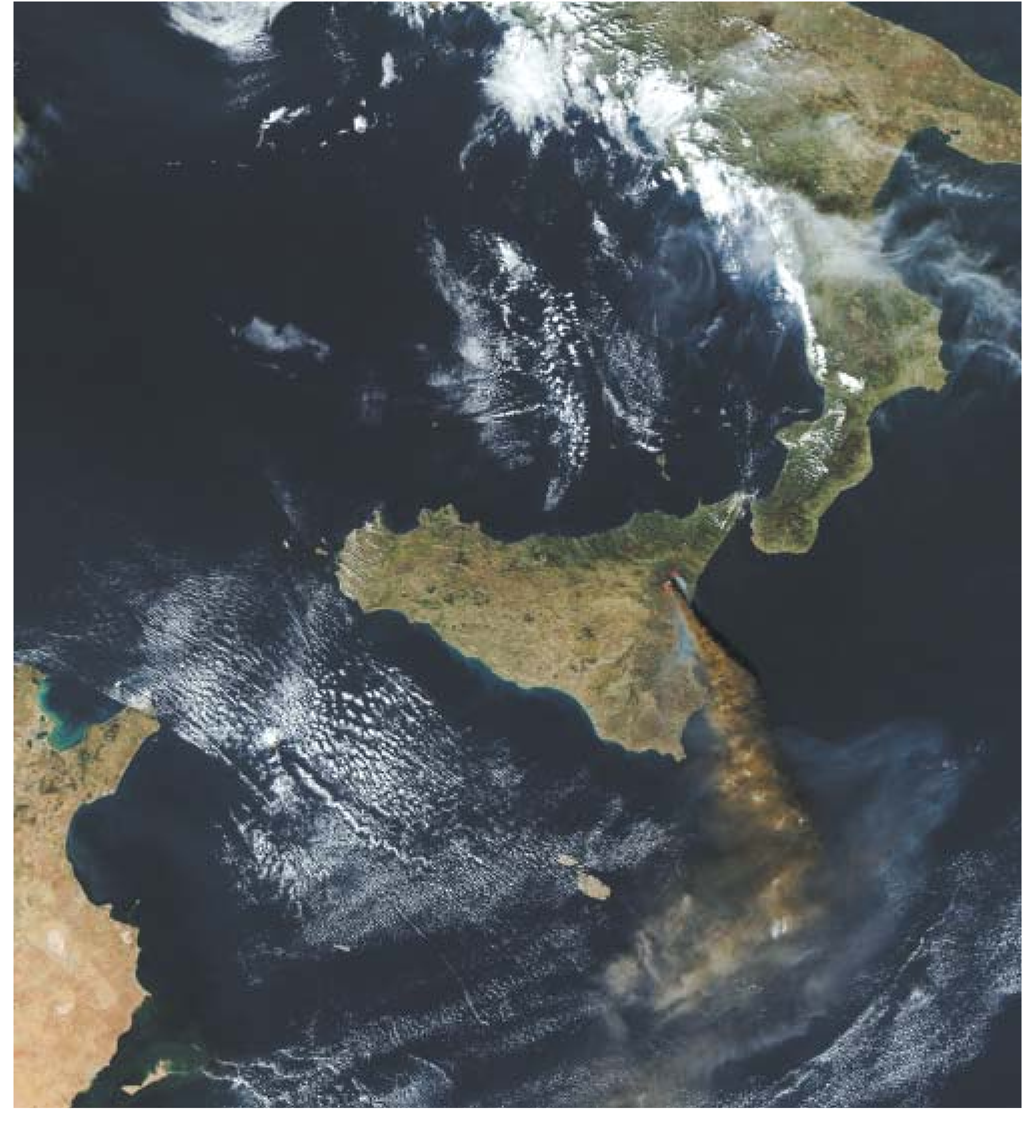
DAVID FIERSTEIN

carbono) puedan escapar. Las burbujas resultantes ascienden dentro de la columna de magma y explotan en superficie, expeliendo fragmentos líquidos y sólidos. Cuando el nivel de la columna magmática está situado a bastante profundidad dentro del volcán, sólo los gases y las partículas finas de ceniza alcanzan el borde del cráter. Cuando se halla más cerca de la superficie, se lanzan también fragmentos mayores (lapilli y bombas). En los infrecuentes casos en que la columna magmática misma alcanza el borde del cráter, el magma en proceso de desgasificación se desborda por el cráter o fluye a través de una fisura y forma una colada de lava.

Comparado con otros volcanes basálticos, el Etna posee un temperamento sorprendente. Además de coladas de lava, produce una descarga rítmica, casi constante, de vapor, ceniza y roca fundida. Este tipo de actividad, conocida con el nombre de "erupción estromboliana" (por el Stromboli, volcán de una de las islas Eólicas, unos cien kilómetros al norte del Etna), culmina a veces en la expulsión de violentas fuentes de lava que se elevan en chorro cientos de metros. Durante la espectacular serie de erupciones del cráter sudeste del Etna en la primera mitad del año 2000, estas fuentes se elevaron hasta 1200 metros por encima del borde del cráter, una altura impresionante rara vez observada en un volcán.

He aprendido por propia experiencia que ser testigo de una erupción de tales características desde poca distancia puede resultar de lo más peligroso. En febrero de 2000 se producían una serie de erupciones violentas en el cráter sudeste del Etna a intervalos de 12 o 24 horas. El 15 de febrero, había anochecido ya, una nube blanca de vapor se elevó de la boca del cráter mientras observaba, junto con otros, desde una distancia de unos 800 metros. Enseguida se volvió más espesa y más densa. Pasados unos minutos, bailaban ya las primeras manchas rojas sobre el cráter, del que se elevaban y adonde volvían a caer. Las explosiones se hicieron cada vez más fuertes, lentamente al principio, luego a velocidad estremecedora. Disparaban bombas a más de mil metros por encima del borde. El cono volcánico que rodea el cráter se cubrió pronto de rocas incandescentes. Al mismo tiempo, se alzó una fuente de lava desde una fractura en el flanco del cono. Varias fuentes más se elevaron desde el cráter y formaron una cortina dorada que rugía mientras iluminaba la escena como la luz de día. Algunas bombas de mayor tamaño cayeron estrepitosamente en la nieve, bastante cerca de nosotros, pero nos sentíamos seguros en el punto de observación. La fuente casi había alcanzado la vertical y un fuerte viento alejaba suavemente de nosotros la masa de lapilli y cenizas incandescentes.

De pronto, la fuente de lava cambió de dirección. Envió un chorro lateral derecho hacia nosotros. Justo a tiempo nos refugiamos en un cobertizo de montaña abandonado, provisto de un grueso tejado de hormigón. Una densa lluvia de piedras incandescentes caía alrededor; bombas de lava de todos los tamaños llegaban rodando, rociando miles de chispas. Afortunadamente, nuestro refugio no fue alcanzado por objetos grandes, aunque una bomba de un diámetro de dos metros se empotró muy cerca en la nieve. Tras dos minutos que parecieron eternos, la fuente de lava se elevó de nuevo de forma vertical, permaneciendo así durante otros diez minutos. Entonces pareció agotarse el suministro de magma que le venía desde abajo. La fuente se apagó como si la hubiera engullido el cráter. El espectáculo completo había finalizado a los treinta minutos de comenzar. Delante de nosotros, el cono de 300 metros de altura brillaba aún en un tono rojo incandescente, pero permanecía en perfecto silencio.



4. UNA PLUMA DE CENIZA del Etna, claramente visible en esta imagen tomada por el satélite Terra de la NASA.

HO, NASA, TERRA SATELLITE *AP Photo*



5. EXPLOSIONES ESTROMBOLIANAS iluminaron los nuevos cráteres del Etna por su flanco norte.

Un agente natural de contaminación atmosférica

La reputación del Etna como un volcán pacífico se debe sobre todo a la fluidez notable de sus lavas. Este tipo de lavas se emiten con facilidad hasta la superficie, a diferencia de los magmas viscosos producidos por los volcanes de las zonas de subducción. Pero los magmas del Etna también contienen una gran cantidad de gases, que pueden hacer que las erupciones sean mucho más explosivas. Durante una fase particularmente violenta, el Etna emite hasta 20.000 toneladas de dióxido de carbono al día; lo convierten en uno de los peores agentes de contaminación de la naturaleza. El elevado contenido en azufre del magma del Etna resulta difícil de entender; esta característica es más típica de los volcanes de zonas de subducción que de los basálticos.

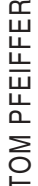
Además, la composición del Etna indica que ha conocido sin duda erupciones explosivas de mayor magnitud, similares a las del Pinatubo en 1991 y el Monte Santa Elena en 1980. La última gran explosión del Etna parece haber ocurrido en 122 a.C. Expelió más de un kilómetro cúbico de lava basáltica en una columna gigantesca cargada de lapilli y ceniza. Los depósitos formados por esta erupción tienen un espesor de hasta dos metros en los flancos superiores del Etna y aún hoy afloran en algunas zonas. En Catania, a unos 30 kilómetros de la cima, los depósitos alcanzan un espesor de entre 10 y 25 centímetros. De ocurrir un evento parecido hoy, sería un desastre. Los tejados de muchas casas se hundirían bajo el peso de la ceniza.

Las raras erupciones laterales ocurridas en 2001 y 2002 dejaron claro que el Etna no está amansado. En 2001 se abrieron hasta cinco fracturas a ambos lados de la montaña. A través de ellas fluyeron ingentes masas de lava. Nació un nuevo cráter a una altitud de 2500 metros. Extremadamente activo, emitió fuentes de lava y densas nubes de ceniza; en unos días formó un cono de unos 100 metros de altura. Singular espectacularidad ofrecían las burbujas gigantescas de magma que subían por el interior del cráter y detonaban con una fuerza abrumadora. La potencia de las explosiones hacía temblar puertas y ventanas hasta una distancia de varios kilómetros.

Pronto se determinó que estaban ocurriendo dos erupciones distintas de forma simultánea. La apertura de las fracturas cerca de la cima del Etna (entre 2700 y 3000 metros por encima del nivel del mar) fue una continuación de la actividad volcánica que había mantenido los cráteres sumitales en estado de ebullición durante años. Pero las erupciones en las fracturas más bajas (a alturas entre 2100 y 2500 metros) produjeron un tipo más evolucionado de magma que, estaba claro, había permanecido durante un período prolongado en una cámara independiente, donde podría haber cambiado su composición química. (Se observó también un patrón similar en las erupciones de 2002.) Este segundo tipo de magma incluía grandes cantidades de cristales del mineral anfíbol, de un centímetro de tamaño, que se observa muy rara vez en las lavas del Etna. Además de hierro, magnesio y sílice, el anfíbol incorpora agua en su estructura cristalina. Sólo se puede formar a partir de un magma que contenga agua en cantidad suficiente. Resultaba evidente la actividad simultánea de dos sistemas diferentes de alimentación del volcán: uno asociado al conducto central, en actividad más o menos constante, y el otro a un conducto independiente, desplazado a un lado.

Unos 15.000 años habían pasado desde que el Etna arrojara por última vez enormes cantidades de magma a través de ese segundo conducto. Una serie de erupciones devastadoras demolieron entonces uno de los edificios volcánicos que precedieron al Etna, el Ellittico. ¿Señala la reaparición del conducto la inminencia de una gran erupción explosiva? La respuesta depende de la procedencia de los magmas del Etna. Determinarla puede presentar gran dificultad: el análisis del magma emitido quizás induzca a error, porque la composición química del fundido original cambia a menudo durante el ascenso a través de la corteza. Los geólogos saben ahora que las lavas de la superficie a veces contienen cristales que conservan la composición del magma original. Si un cristal comienza a formarse en una etapa temprana de la vida de un magma, puede que incluya gotitas minúsculas del fundido primitivo y crezca en torno a ellas. Estas inclusiones fluidas quedan, por tanto, aisladas de todo cambio químico posterior.

Analizar tales inclusiones fluidas resulta difícil. Hasta hace poco, apenas se disponía de datos apropiados relativos al Etna. En 1996, un equipo de investigación franco-italiano, integrado por Pierre Schiano (Universidad Blaise Pascal, París), Roberto Clocchiatti (Centro de Estudios Nucleares de Saclay en Gif-sur-Yvette), Luisa Ottolini (Consejo Nacional de Investigaciones, Pavía) y Tiziana Busà (Universidad de Catania), emprendió un amplio estudio



de los magmas del Etna y los volcanes adyacentes. Buscaron inclusiones vítreas en cristales de olivino, que son de los primeros en formarse a partir de un fundido primitivo. Fundieron de nuevo sobre una placa calefactora las pequeñísimas inclusiones que descubrieron, cada una de las cuales medía menos de dos décimas de milímetro de diámetro, y las apagaron para crear un vidrio homogéneo. Utilizando una microsonda (que dirige haces estrechos de rayos X hacia la muestra) y un espectrómetro de masas iónico secundario (que emplea haces de iones), el equipo determinó la composición química de las inclusiones.



TOM PFEIFFER

6. LAS COLADAS DE LAVA bloquearon las carreteras y atravesaron el bosque en la cara norte del Etna en noviembre de 2002.

Cambio de carácter

Prestaron especial atención a los elementos presentes sólo como trazas, entre ellos el cesio y el bario, poco frecuentes en las rocas ígneas. Cuando se forma un fundido a gran profundidad, las trazas incluidas en la roca originaria emigran casi completamente hacia el magma. Debido a que sus concentraciones relativas permanecen sin alteración reseñable, ofrecen una huella geológica del origen del fundido. Las composiciones de los magmas emitidos por el Etna hace más de unos 100.000 años eran similares a las de los volcanes más antiguos, y ahora extintos, de los montes Ibleos del sur de Sicilia. Los patrones de las trazas recordaban también a los encontrados en magmas de los volcanes de punto caliente de Hawai y de las Azores. El volcanismo más antiguo del Etna parece haberse alimentado de una pluma del manto, probablemente la misma que alimentó los volcanes de los Ibleos.

Pero el análisis de los magmas más jóvenes (emitidos dentro de los últimos 100.000 años) reveló un panorama muy distinto. Poseen grandes concentraciones de elementos de trazas —cesio, potasio, rubidio y bario—, pero parecen carecer de titanio y circonio. Se observan patrones similares en los volcanes de las islas Eólicas, entre los que se cuentan el Stromboli y el Vulcano. Este arco insular debe su existencia a fuerzas tectónicas, en concreto las generadas por la subducción de la corteza oceánica del mar Jónico bajo el bloque de Calabria (la parte más meridional del oeste de la península italiana). Schiano y Clocchiatti están convencidos de que la similitud de los magmas no es pura coincidencia. Creen que el Etna posee dos fuentes de magma: la pluma del manto que alumbró el volcán y un segundo componente, idéntico al magma que alimenta los volcanes de las Eólicas. Además, los magmas más jóvenes del Etna poseen las mayores cantidades de este segundo componente.

¿Cómo produce el Etna tal mezcla ardiente de magmas? Una posibilidad es que los dos magmas se formen en distintos emplazamientos y se mezclen en algún punto del sistema de alimentación del Etna. Según esta hipótesis, el magma subyacente bajo las islas Eólicas se desplaza más de 100 kilómetros a lo largo de una falla tectónica, hasta el Etna. Se considera muy improbable que exista tal pasadizo magmático subterráneo. Parece más verosímil que ambas *fuentes* de magma se estén mezclando. De acuerdo con este segundo modelo, una parte de la plancha sumergida de la placa jónica ha emigrado hacia el sur al alcance de la pluma que hay bajo el Etna. Cuando la pluma ascendente pasa por el borde de la plancha que se hunde, crea la mezcla de magma que emerge a través del volcán.

La actividad del Etna se ha incrementado de forma notable desde 1970, con erupciones más frecuentes y una mayor emisión de material volcánico. Sin embargo, no se puede precisar si este resurgir lo causan fuerzas tectónicas o una nueva porción de magma que asciende desde el manto. Si el Etna está de veras transformándose en un volcán explosivo de zona de subducción, el proceso será gradual. Como señalan Schiano y Clocchiatti: “El cambio observado [de un volcán de punto caliente a uno de arco insular] tiene lugar a una escala de tiempos geológicos, no a escala humana”. Por lo tanto, es improbable que el Etna sufra, a corto plazo, una erupción explosiva catastrófica.

Pero si la hipótesis de estos investigadores es correcta, las erupciones del Etna se volverán cada vez más violentas. Dentro de unas decenas de miles de años, el Etna podrá muy bien resultar tan peligroso como el Monte Santa Elena o el Pinatubo. Por suerte, los sicilianos dispondrían de mucho tiempo para adaptarse a la nueva situación.

Bibliografía complementaria

MOUNT ETNA: ANATOMY OF A VOLCANO. B. K. Chester, A. M. Duncan, J. E. Guest y C. R. J. Kilburn. Chapman and Hall, 1985.

TRANSITION OF MOUNT ETNA LAVAS FROM A MANTLE-PLUME TO AN ISLAND-ARC MAGMATIC SOURCE. P. Schiano, R. Clocchiatti, L. Ottolini y T. Busà, en *Nature*, volumen 412, n.º 6850, págs. 900-904; 30 de agosto de 2001.



Amanda Gefter

FOTINI MARKOPOULOU KALAMARA: A vueltas con Einstein

La física Fotini Markopoulou Kalamara ha hallado una manera de compaginar la relatividad con la teoría cuántica sin que la causa deje de preceder al efecto

Habla de física como si se tratase de andar entre pucheros. "Mi virtud consiste en sacar de donde no hay. Un ingrediente de aquí y otro de allá, más algo nuevo". El arte está en saber cuáles utilizar y cómo combinarlos para que cuando suene el timbre del horno salga un universo en su punto.

A la ateniense Fotini Markopoulou Kalamara, de 31 años, se la tiene por una de las más prometedoras figuras de la física. Hace poco aceptó una plaza en el Instituto Perímetro de Física Teórica, en Waterloo (Ontario), la versión canadiense del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Allí trabaja con físicos de renombre —Robert Myers, Lee Smolin—. Su objetivo es conciliar la relatividad general de Einstein y la teoría cuántica para así explicar la naturaleza del espacio y del tiempo.

Podría decirse que esta unificación es la asignatura pendiente de la física moderna. La teoría de cuerdas ha venido siendo la mayor esperanza. Propone que constituyen la materia diminutas cuerdas unidimensionales; sus diversas vibraciones componen la conocida melodía de las partículas, como si de notas musicales se tratara.

DEREK SHAPTON

Aunque la teoría de cuerdas llega a incorporar la gravedad en una descripción cuántica de la materia, algunos creen que adolece de ciertos defectos que impiden que se convierta en la definitiva teoría universal. Para empezar, presupone 26 dimensiones espaciales, muchas más de las que han podido descubrirse experimentalmente. Y si bien las cuerdas describen la materia, no explican el espacio en que se agitan. Puede que nuevas versiones de la teoría de cuerdas afronten el problema. Pero una pequeño grupo de físicos, entre los que se cuentan Smolin, Abhay Ashtekar (de la Universidad estatal de Pennsylvania) y Carlo Rovelli (del Centro de Física Teórica de Marsella) apuestan por un enfoque diferente: la gravedad cuántica de lazos (GCL).

Según la GCL, constituyen el mundo lazos que interactúan y se combinan para formar redes de espines (el primero en concebirlas fue el matemático inglés Roger Penrose, hacia los años sesenta, en forma de grafos abstractos). Smolin y Rovelli utilizaron las técnicas ordinarias para cuantizar las ecuaciones de la relatividad general. Descubrieron redes de Penrose soterradas en las matemáticas. Los nodos y los bordes de esos grafos tomaban unidades discretas de área y de volumen; daban lugar a un espacio cuántico tridimensional. Pero como los dos teóricos partieron de la relatividad, aún les quedaba algún atisbo de espacio al margen de las redes cuánticas.

Tal era la situación de la GCL a finales del decenio pasado, cuando Markopoulou Kalamara comenzó a abordarla. Dio con esa teoría por casualidad. "No me decidí por la física hasta los 16 o 17 años. Antes, quise ser muchas cosas: arqueóloga, astronauta, pintora". Cuando cursaba la carrera en la Universidad de Londres, un amigo que estudiaba física teórica le recomendó las clases que impartía Chris Isham, teórico de la gravedad cuántica, en el Colegio Imperial de Londres. "Me venía de paso al volver a casa, así que fui una vez por semana, y me encantó". Consiguió que Isham le dirigiera la tesis; se doctoró en gravedad cuántica. Como investigadora postdoctoral, trabajó con Smolin en la Universidad estatal de Pennsylvania.

Markopoulou Kalamara enfocó los extraños problemas del espacio en la CGB preguntándose: ¿por qué no partir de la red de espines de Penrose (que no está inmersa en ningún espacio preexistente), agregar algunos resultados de la CGB y ver qué sale? Obtuvo unas redes que no existen en el espacio, que no están hechas de materia, sino que engendran, por su misma arquitectura, el espacio y la materia. Desde esa pers-

pectiva, no hay cosas, tan sólo relaciones geométricas. El espacio ya no es un lugar donde los objetos —las partículas elementales— chocan y se agitan, sino un caleidoscopio de estructuras y procesos que cambian sin cesar.

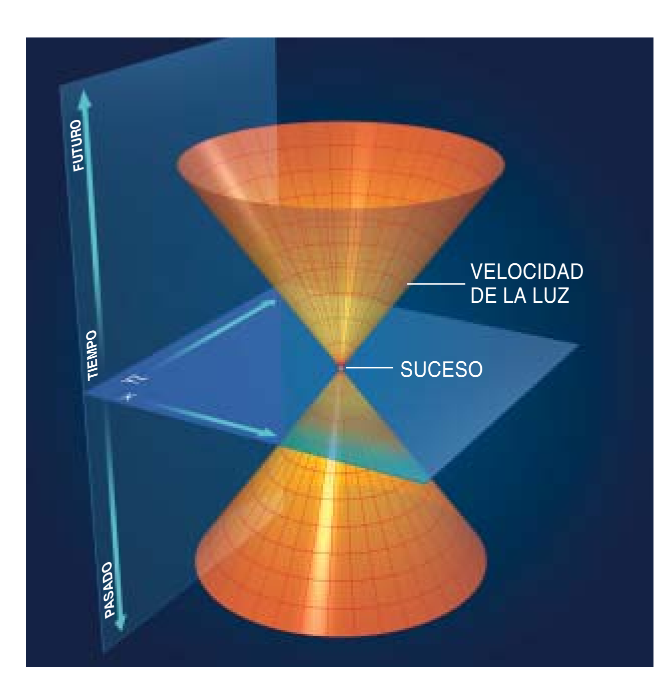
Cada red de espines podría compararse a una fotografía, a un momento del universo que ha quedado petrificado. Al salir del papel, las redes de espines evolucionan y cambian según reglas matemáticas simples; crecen y se complican, y por último surge el espacio a gran escala que habitamos.

Siguiendo esta evolución, Markopoulou Kalamara explica la estructura del espacio-tiempo. En particular, argumenta que los lazos abstractos generan uno de los conceptos más característicos de la teoría de Einstein: el cono de luz, la envoltura de la región de espacio-tiempo accesible desde un punto cualquiera de éste —el vértice del cono—. Los conos de luz garantizan que la causa preceda al efecto. Para comprender esta idea, contémplese el cielo: no podemos ver innumerables estrellas porque no ha pasado suficiente tiempo desde el nacimiento del universo para que su luz nos alcance; caen más allá de nuestro cono de luz.

No resulta tan claro, sin embargo, dónde encajan los conos de luz en las redes de espines. Esas redes están sujetas a la mecánica cuántica, país de las maravillas donde reina la incertidumbre: toda red tiene la posibilidad de evolucionar en una infinidad de redes nuevas sin dejar traza alguna de una historia causal. "Nos valíamos de un lenguaje con el que no sabíamos introducir en la GCL la noción de causalidad", dice Smolin. Markopoulou Kalamara descubrió que fijando los conos de luz a los nodos de las redes su evolución se volvía finita y se preservaba la estructura causal.

Pero una red de espines representa el universo entero; eso crea un grave problema. Según la interpretación más aceptada de la mecánica cuántica, las cosas permanecen en el limbo de la probabilidad mientras un observador no las perciba. Pero ningún observador solitario puede ir allende los límites del universo y mirar atrás. Entonces, ¿cómo es que existe el universo? "Es un problema en verdad espinoso", dice Markopoulou Kalamara. "¿Quién mira al universo?" Según ella, la respuesta es: nosotros mismos. El universo contiene sus propios observadores, representados por nodos en la red. Su idea es que el cuadro no tiene por qué pintarlo entero un pintor; puede pintarse entre varios. Comprendió que los mismos conos de luz con que había introducido la estructura causal en el espacio-tiempo cuántico podían definir la perspectiva de cada observador.

Como la velocidad de la luz es finita, sólo se puede ver una porción limitada del universo. Puesto que cada posición concreta en el espacio-tiempo es única, la porción que se observa desde cada una difiere de todas las demás. Aunque no existe ningún observador externo que disponga de acceso a toda la información habida y por haber, cabe construir un retrato cabal del universo gracias a la información parcial que recibimos. Es un pensamiento hermoso: cada uno tiene propio universo. Pero se superponen. "Todos observamos casi lo mismo", explica Markopoulou Kalamara, razón por la cual vemos un universo sin solución de continuidad en lugar de un espacio-tiempo cuantizado. "Realmente pienso que la física teórica se parece mucho al arte", concluye Markopoulou Kalamara, que es hija de escultores. "Juntar todas estas cosas es como tomar arcilla y construir algo donde no había nada, y que valga desde todos los lados. Me gusta la parte creativa, pero también que pueda contrastarse".



*Los conos de luz, generados al representar la velocidad de la luz en función del tiempo y de tres dimensiones del espacio (*x *por un lado,* z *e* y *juntas por otro), definen todas las conexiones pasadas y futuras con un suceso determinado*

SLIM FILMS

El momento de la contrastación se acerca raudo. Aún quedan detalles por pulir, como la derivación del tiempo unidimensional ordinario a partir de la causalidad cuántica, pero le parece que si las observaciones confirman lo esencial de las redes de espines, ella podrá allanar el camino. Un experimento quizá consistiese en registrar los fotones de rayos gamma originados a miles de millones de años luz. Si el espacio-tiempo es realmente discreto, los fotones individuales deberían viajar a velocidades un poco distintas según cuál fuera su longitud de onda. Markopoulou Kalamara intenta descifrar la forma de esa dispersión.

Si se confirman, sus predicciones podrían cambiar para siempre nuestras ideas sobre la estructura del espacio. La gravedad cuántica se pondría a prueba de varias maneras en los próximos años. "Siempre me digo que si no acaba por ser física real, si no puede someterse a experimentos, me voy a conseguir un trabajo bien pagado en Nueva York. Pero no veo razón alguna por la que no pueda ser así. Siempre existe esa posibilidad." Mientras tanto, sigue trabajando duro, esperando que suene el timbre del horno.

Taxodiáceas

Características epidérmicas

Las taxodiáceas constituyen un pequeño grupo de coníferas que habitan en regiones con climas subtropicales o templado-húmedos de América del Norte, este de Asia y Tasmania. Se trata de plantas longevas, con tendencia al gigantismo y porte elegante. Representantes conspicuos de esa familia son la secuoya y el ciprés de los pantanos, conocidas en Europa por su cultivo como plantas ornamentales.

Constan de nueve géneros —si dejamos de lado a *Sciadopitys*—, en su mayoría monoespecíficos, y 13 especies: *Athrotaxis cupressoides, A. laxifolia, A. selaginoides, Cunninghamia lanceolata, Taiwania cryptomeroides, Cyptomeria japonica, Sequoiadendron giganteum, Sequoia sempervirens, Metasequoia glyptostroboides, Glyptostrobus lineatus, Taxodium ascendens, T. distichum* y *T. mucronatum*. Las taxodiáceas presentan tres tipos foliares: escuamiforme, linear y escamoso-aleznado. *Metasequoia glyptostroboides* y algunas especies del género *Taxodium* pierden sus hojas en los períodos invernales.

Merced a la combinación de estudios morfológicos y moleculares se ha planteado la inclusión de esta familia de resinosas en el seno de las Cupressaceae, la familia del ciprés común, en cuyo caso las antiguas Taxodiaceae serían las integrantes más arcaicas de Cupressaceae.

El registro fósil confirma que las Taxodiaceae gozaron de una diversidad y una distribución geográfica mayores de las que disfrutan en la actualidad. Los registros más antiguos son conos ovulíferos del Jurásico de Argentina adscritos al género *Paraaraucaria* (con unos 200 millones de años). Desde el Jurásico Medio, en Eurasia y Norteamérica se desarrollaron especies de Taxodiaceae, donde se insinúan caracteres de géneros actuales.

Durante el Terciario, poblaron amplias zonas del hemisferio norte, incluida la península Ibérica, Taxodiaceae cuyas características ecológicas diferían de las que distinguen a las actuales. Resulta relativamente frecuente el hallazgo de hojas fosilizadas de taxodiáceas en materiales mesozoicos y cenozoicos de Eurasia y Norteamérica, lo que ha permitido el estudio de su morfología externa y anatomía cuticular.

La facilidad con que las cutículas de las plantas de esta familia se conservan en los sedimentos se debe a la dureza de la cutina, cuya composición química les confiere una gran capacidad de resistencia frente a los procesos degradativos. En la cutícula queda impresa la morfología de las células epidérmicas, lo que facilita su descripción. Mucho más atrasada que su investigación paleontológica se hallaba el estudio de la epidermis foliar de las taxodiáceas vivas.

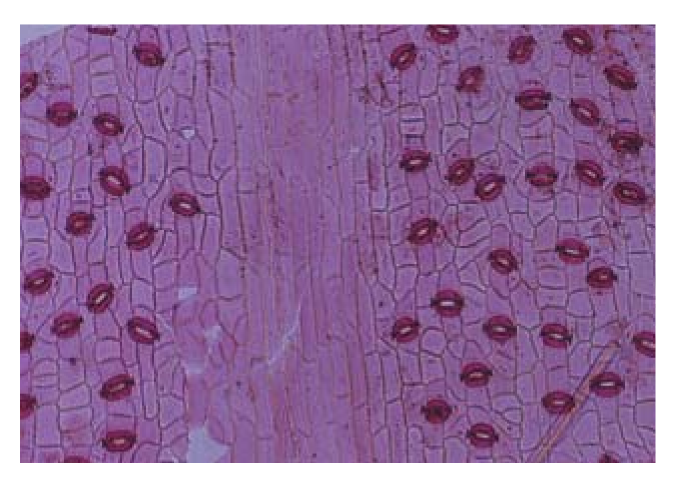
Para abordarla, empezamos por reunir una extensa muestra de las especies actuales. En la mayoría de los casos, comprobamos que las hojas son anfistomáticas, con estomas en haz y envés; no siguen esa regla ni *Cunninghamia lanceolata* ni *Metasequoia glyptostroboides*, que los poseen sólo en el envés (hipostomáticas). Por norma, los estomas aparecen hundidos, salvo en las dos especies anteriormente citadas, *Cryptomeria japonica* y *Taxodium mucronatum*, en las que se disponen de forma superficial.

Los estomas se organizan en dos bandas, de anchura variable y paralelas al nervio medio foliar. De un modo general, dibujan líneas longitudinales, no siempre continuas, cuya densidad varía a lo largo de la hoja según la especie. Los estomas son fundamentalmente de tipo haploquéilico (a partir de células iniciales diferentes se desarrollan células oclusivas y anejas) y monociclocítico (células oclusivas rodeadas por un anillo de células anejas). Se observan, sin embargo, estomas de tipo anomocítico (estomas sin anillo de células anejas) en las especies *C. lanceolata* y *M. glyptostroboides* y en el envés de las especies del género *Taxodium*.

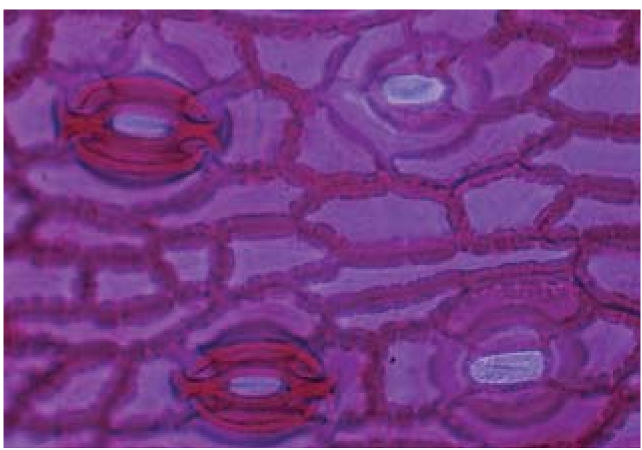
Las longitudes de las células anejas se incluyen en el intervalo de 15 a 110 mm. Las células oclusivas



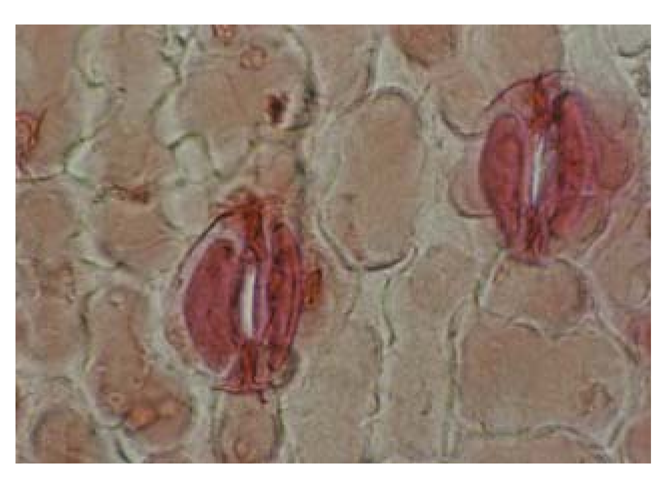
1. Porte de un ejemplar de Taxodium mucronatum *cultivado en el parque del Retiro (Madrid), con follaje de verano*



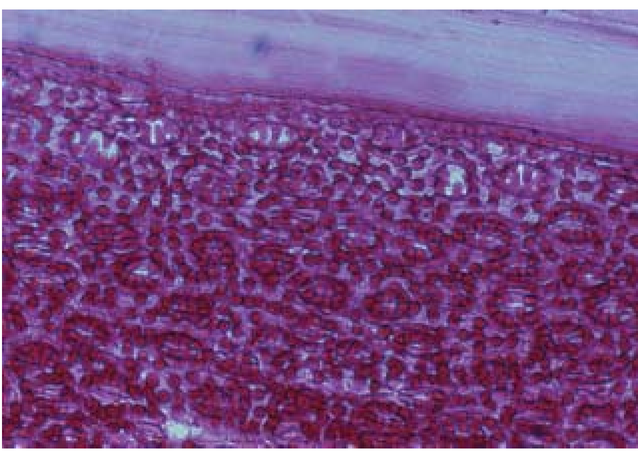
2. Aspecto de las dos bandas estomáticas en el envés de una hoja de Taxodium mucronatum*. Los estomas, anomocíticos, se disponen perpendiculares al nervio medio foliar que presenta células rectangular-alargadas. ×150 aumentos*



3. Estomas monociclocíticos de Sequoiadendron giganteum*. Se observan engrosamientos de lignina en las terminaciones polares de las células oclusivas y punteaduras en el resto de las células epidérmicas. Dos de los estomas han desaparecido durante el proceso de preparación de la epidermis. ×500 aumentos*



4. Estomas anomocíticos rodeados de células papilosas en Metasequoia glyptostroboides*. ×500 aumentos*



5. Banda estomática con estomas rodeados por papilas en Sciapotipys verticillata*. ×150 aumentos*

presentan engrosamientos de lignina en las terminaciones polares, y se orientan paralelas al nervio medio foliar, menos en las especies del género *Taxodium*, que poseen los estomas perpendiculares al nervio medio foliar. Si nos referimos a los valores medios de tamaño de las células oclusivas, diremos que las más pequeñas corresponden a *T. mucronatum* con 25,6 mm. Le siguen en longitud las de *Glyptostrobus lineatus* y *Athrotaxis selaginoides*, siendo las de *C. lanceolata* y *S. giganteum*, de hasta 70 mm, las mayores.

Entre las células epidérmicas, que aparecen tanto en el haz como en el envés, se distinguen dos tipos fundamentales: células rectangular-alargadas punteadas, orientadas longitudinalmente respecto al nervio medio, y células epidémicas localizadas en las bandas estomáticas, de morfología y tamaño variables. Como excepción entre las taxodiáceas, *M. glyptostroboides* presenta células papilosas en su envés. (Las papilas son un carácter de adaptación al medio.)

Los botánicos han venido incluyendo la conífera japonesa *Sciadopitys verticillata* en la familia Taxodiaceae. Carente de hojas, porta filoclados alargados dispuestos en verticilos, carácter que difiere del resto de taxodiáceas. Los filoclados son hipostomáticos y muestran una sola banda central, ancha, con estomas monociclocíticos hundidos, orientados paralelamente al nervio medio y dispuestos en varias líneas continuas longitudinales; son estomas muy singulares, con células anejas papilosas. Todo indica que esta especie debería incluirse en otra familia, la Sciadopityaceae.

El registro fósil revela que la familia Taxodiaceae alcanzó durante el Mesozoico y el Cenozoico mayor diversificación que la que muestra hoy. Los primeros testigos del género *Athrotaxis* provienen del Jurásico de la India. Durante el Mesozoico y gran parte del Terciario este género se extendía por la Patagonia, la Antártida, Australia y Nueva Zelanda. En el Terciario superior desapareció de Nueva Zelanda. Aunque cuenta con tres especies, se le debe considerar un género

relíctico en esa región, ya que únicamente se encuentra en la isla de Tasmania.

Por lo que se refiere a las especies asiáticas, mejor conocidas desde un punto de vista paleontológico que las del hemisferio sur, se supone un origen boreal para *Glyptostrobus* y *Metasequoia* durante el Cretácico, período geológico en el que por esta región se extendían bosques mesófilos caducifolios.

Glyptostrobus ocupa ahora un nicho ecológico muy diferente. Habita en bosques paratropicales. El carácter hundido de los estomas de la especie *G. lineatus* podría deberse a un fenómeno de constricción filogenética, originado quizá durante el desarrollo del género en zonas templadas. Este carácter no tiene sentido en la actualidad puesto que habita en regiones lluviosas. Pudiera repetirse el mismo fenómeno en *M. glyptostroboides*. La epidermis abaxial papilosa de esta especie podría estar relacionada con adaptaciones a una sequía ambiental que en la actualidad no padece. *M. glyptostroboides* forma bosques mixtos en China con *C. lanceolata*; ambas presentan células epidérmicas onduladas, lo que podría ser indicativo de una estrategia similar de adaptación al medio actual donde ahora habitan.

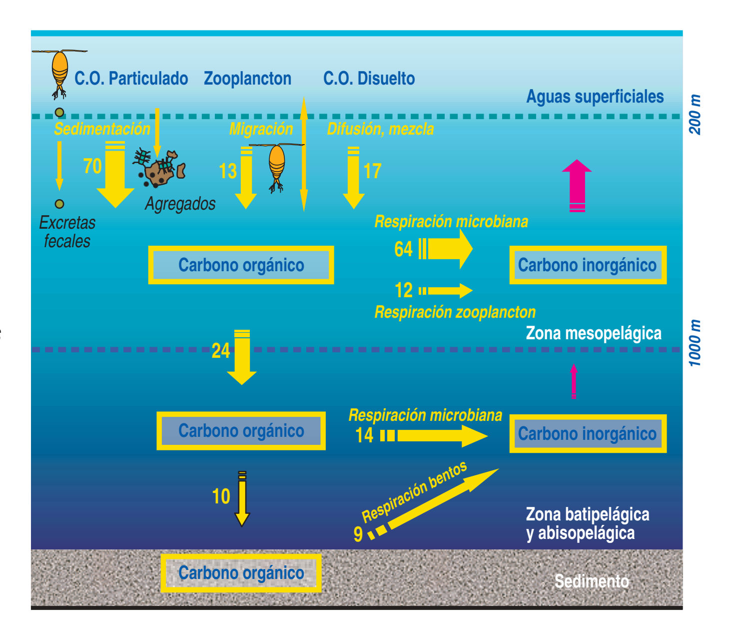
EDUARDO BARRÓN y ANA BUADES
Dptos. de Paleontología y Biología Vegetal
Universidad Complutense de Madrid

Profundidades oceánicas

La función de la respiración

Hace poco más de un siglo, investigadores marinos de Europa y Estados Unidos protagonizaban una agria polémica sobre la existencia de vida en las profundidades oceánicas. Si bien ya en la primera gran expedición oceanográfica, llevada a cabo en 1888 por el *Challenger*, se habían encontrado muestras biorgánicas hasta 1000 metros de profundidad, hubo que esperar a mediados del siglo XX para aislar y contar bacterias de aguas muy profundas. Su presencia demostraba que había vida desde la superficie hasta el fondo de los océanos.

En 1968, un fallo en la maniobra de preparación del *Alvin* provocó su hundimiento. No estaban a bordo los tripulantes, pero sí su almuerzo preparado. Diez meses después se recuperaba del fondo del océano Atlántico el batiscafo. Los alimentos seguían casi intactos. Este incidente fortuito, como otros muchos en la historia de la ciencia, propició un tímido despertar de las investigaciones sobre la descomposición de materia orgánica en el fondo del mar. Sin embargo, las dificultades metodológicas para estudiar el metabolismo microbiano en estas profundidades (donde los organismos están sometidos a grandes presiones y bajas temperaturas) y el hecho de que las tasas



Transporte de materia orgánica hacia el fondo del océano y respiración por los organismos. Los números representan, en porcentaje, la importancia relativa aproximada de cada uno de los flujos

respiratorias de los microbios parecieran tan extremadamente bajas acabaron por minar el interés de la comunidad científica.

Un interés que, sin embargo, ha vuelto a despertar al abordarse la respiración oceánica en el marco de los estudios sobre el cambio climático. El océano desempeña un papel clave en la regulación del CO_2, el principal gas de invernadero, y por tanto en el clima del planeta. El océano constituye la mayor reserva de carbono activo de la biosfera, con aproximadamente 50 veces más carbono que en la atmósfera.

Una gran parte de este carbono no inmovilizado en los sedimentos o rocas —de ahí el calificativo de activo— procede de la respiración de los microorganismos al descomponer la materia orgánica que se genera en las aguas superficiales y se transporta (bien en forma de partículas, de agregados amorfos o completamente disuelto) hasta los fondos oceánicos.

Sin embargo, pese a la importancia que reviste la respiración en las aguas profundas para la formación de CO_2, no se había cuantificado la magnitud de la respiración desde la superficie hasta el fondo del océano. Una tarea que los autores acaban de culminar con otros investigadores canadienses y estadounidenses.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la respiración integrada en las profundidades oceánicas (desde 200 metros hasta el fondo) es muy superior a lo que se presumía, siendo comparable a la respiración integrada en las aguas superficiales (0-200 m). Aproximadamente entre un 70 % y un 90 % de la respiración en aguas profundas se produce en la franja entre 200 m y 1000 m (la denominada “zona mesopelágica” o “zona de penumbra”); a mayores profundidades, disminuyen drásticamente las tasas respiratorias.

La zona mesopelágica constituye una barrera intermedia para el paso de la materia orgánica hacia las

profundidades batiales y abisales (superiores a los 1000 metros), donde el carbono quedaría “secuestrado” durante cientos de años, hasta que las masas de agua volvieran a aflorar y entrar en contacto con la atmósfera. La magnitud de la respiración en aguas batiales y abisales, y por tanto la capacidad del océano de secuestrar carbono, dependerán de la cantidad y características de la materia orgánica que se hunde, y de la eficiencia de las comunidades microbianas que viven en la zona mesopelágica en descomponer la materia orgánica en su tránsito hacia el fondo: cuanto más profundo se respire la materia orgánica, más tiempo permanecerá el CO_2 respirado almacenado en el interior del océano, sin entrar en contacto con la atmósfera.

La materia orgánica que se respira en el fondo del océano procede de tres fuentes principales: restos, materia orgánica disuelta y materia orgánica acarreada en el aparato digestivo de organismos. En el primer caso se trata de los restos de vegetales y animales que se hunden, bien en forma de agregados amorfos de materia orgánica (a veces denominados “nieve marina”) o empaquetados fecales excretados por el zooplancton. La materia orgánica disuelta se transfiere por procesos de difusión o mezcla de masas de agua. Por último, se transporta materia orgánica en el digestivo de organismos del zooplancton que se alimentan durante la noche en aguas superficiales y migran durante el día hacia profundidades de hasta 1000 m, donde excretan y respiran.

De los tres procesos el primero parece, sin duda, el más importante en magnitud. Pero queda mucho por averiguar sobre los mecanismos de agregación y disolución de la materia orgánica en las profundidades, sobre los principales grupos de microorganismos responsables de la transformación y respiración de la materia orgánica y sobre las diferencias regionales entre distintos océanos en la cantidad y características de la materia orgánica que se transfiere hacia las zonas abisales y batiales.

Todo hace pensar que se ha abierto un apasionante campo de investigación para los próximos años con el estudio de la respiración en las profundidades oceánicas. El paradigma sobre la degradación de materia orgánica en las profundidades oceánicas está cambiando hacia una visión mucho más dinámica, donde zooplancton, protozoos, bacterias y arqueobacterias interaccionan con la materia orgánica, a medida que ésta se transporta hacia el fondo del océano.

Recientemente, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, organismo internacional encargado de coordinar los estudios sobre el clima, llamaba la atención de la comunidad científica por la escasez de datos reales sobre distribución y flujos de carbono en el océano, necesarios para validar los modelos de predicción climática basados en el ciclo del carbono en la biosfera. Esperamos que este reto que se nos ofrece cuente con el apoyo social y económico necesario para afrontarlo con garantías de éxito. Las recientes catástrofes provocadas por petroleros han puesto de manifiesto que la humanidad tiene más capacidad para trabajar e investigar sobre la superficie de la Luna (o incluso de Marte) que en los fondos oceánicos, que se extienden por dos terceras partes de nuestro propio planeta. El estudio de los procesos ecológicos que tienen lugar en el océano profundo es un reto que se ha de abordar de forma imperativa en el siglo XXI.

JAVIER ARÍSTEGUI
Facultad de Ciencias del Mar,
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria,
Islas Canarias

CARLOS M. DUARTE y SUSANA AGUSTÍ
Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados
(IMEDEA), CSIC-Univ. Islas Baleares

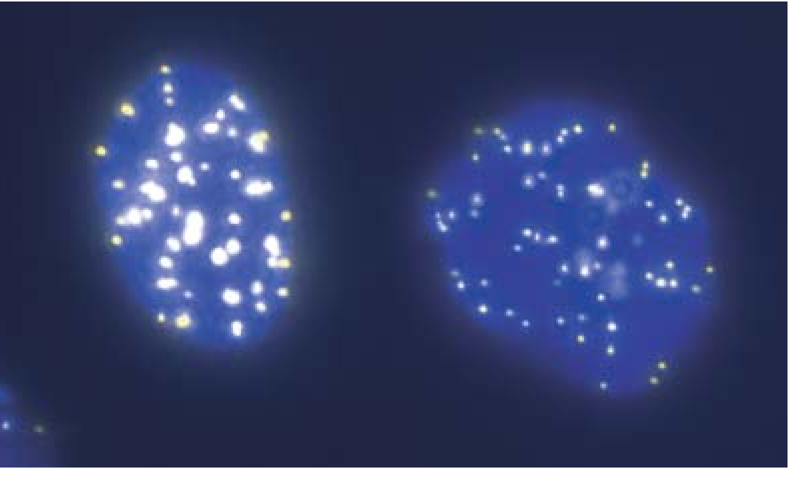
Conexión entre el ciclo celular y los telómeros

Importancia para el cáncer

La regulación de la división celular es decisiva para el desarrollo normal de los organismos multicelulares; la pérdida de este control conduce al cáncer. Por ello, las células están programadas para dividirse un número determinado de veces. Este límite en la capacidad proliferativa permite que las células se dividan lo suficiente para cubrir las necesidades proliferativas a lo largo de la vida de un organismo y sirve como freno frente a una proliferación celular excesiva, actuando así como una barrera protectora frente al cáncer.

Las células humanas en cultivo tienen una capacidad proliferativa limitada. Tras la acumulación de un número característico de divisiones, entran en un estado de senescencia, no proliferativo. Este estado se mantiene gracias a proteínas como p53 y Rb (retinoblastoma), que controlan el ciclo celular y actúan como supresores tumorales bloqueando la progresión a través del ciclo. Rb es un regulador clave del ciclo celular ya que controla el paso a través del “punto de restricción”, situado al final de la fase G1. Una vez superado este punto, la célula ya no responde a señales extracelulares reguladoras del crecimiento y avanza hacia la división. Si se eliminan estos supresores tumorales, las células escapan de la senescencia y pueden seguir dividiéndose aunque no de forma indefinida. Existe otro freno que las células deben superar para poder convertirse en inmortales: el acortamiento telomérico.

Los telómeros son secuencias de ADN repetitivo que protegen los extremos de los cromosomas. Se mantienen tales secuencias gracias a la telomerasa, que añade repeticiones teloméricas al final de los cromosomas para compensar la pérdida de secuencias que se produce durante la replicación del ADN. La mayoría de las células somáticas humanas carecen de actividad telomerasa; los telómeros se van acortando progresivamente tras cada ciclo de división celular. Se ha propuesto que los telómeros son el “reloj mitótico” que cuenta el número de veces que la célula se ha dividido, de tal forma que, cuando se al-



La figura muestra las dos poblaciones (una que posee telómeros de longitud normal y otra con telómeros extremadamente largos) presentes en las células TKO. Nótese la diferencia en intensidad de los telómeros (en amarillo) *entre las dos células*

canza una longitud telomérica crítica, la célula deja de dividirse.

Así, cuando en células humanas en cultivo se inactivan p53 y Rb las células pueden seguir dividiéndose, pero en cada división que se produce el telómero se va acortando. Tras unas cuantas divisiones, se alcanza una longitud telomérica crítica y las células entran en crisis. Para lograr superar esta crisis, las células deben buscar algún mecanismo que les permita mantener sus telómeros, por ejemplo, mediante la activación de la telomerasa.

Por tanto, existen dos mecanismos claves en el control de la división celular: el reloj mitótico y los supresores tumorales. El reloj mitótico (los telómeros) cuenta el número de veces que una célula se ha dividido y determina el momento en que una célula ha de dejar de hacerlo; los supresores tumorales cuidan de llevar a cabo esta parada. Para que una célula se convierta en tumoral ha de lograr burlar los dos mecanismos. Así, la mayoría de los tumores humanos han activado la enzima telomerasa para proteger sus telómeros y desactivado los supresores tumorales Rb y p53 para poder crecer indefinidamente.

En un reciente estudio llevado a cabo en fibroblastos embrionarios de ratón (*murine embryo fibroblasts*, MEF) hemos logrado establecer una conexión entre estas dos vías. En el ratón, la familia de proteínas Rb está constituida por tres miembros: Rb1 (*retinoblastoma* 1), Rbl1 (*retinoblastoma-like* 1) y Rbl2 (*retinoblastoma-like* 2). Se había descrito que los MEF que carecen de estas tres proteínas (*triple knock-out*, TKO) no atraviesan por la etapa de senescencia y podían dividirse indefinidamente.

A través de un análisis más detallado hemos podido establecer que, cuando estas células se cultivan aparecen dos poblaciones diferentes: la que posee telómeros de longitud normal y la que muestra telómeros extremadamente largos. Al principio la población con telómeros normales es mayoritaria (87 % de células con telómeros normales frente a un 13 % de células con telómeros largos). A medida que aumenta el número de pases en cultivo, el porcentaje de células con telómeros de longitud normal disminuye desde el 87 % a pase 1 hasta el 0 % a pase 9. Estos resultados indican que a medida que los MEF TKO se van dividiendo en cultivo ocurre una rápida selección de las células con telómeros largos. Aunque hemos dicho que los MEF TKO en cultivo se comportan como inmortales, existe un pequeño incremento de muerte celular a pases tempranos (entre pase 4 y pase 6), que desaparece después de pase 6.

A la luz de estas observaciones se puede concluir que las células TKO que se seleccionan a través de los pases en cultivo y que son inmortales, también muestran una desregulación de la longitud telomérica.

El hecho de poseer telómeros largos no parece ser el único responsable de la inmortalidad de estas células. Los MEF que carecen de Rbl1 y Rbl2 y conservan Rb1 (*double knock-out*, DKO), aunque también poseen telómeros anormalmente largos, entran en el estado de senescencia tras unos pocos pases en cultivo. Parece que es la pérdida adicional de Rb1 lo que permite que estas células con telómeros extremadamente largos se dividan sin fin.

Merced a esos trabajos se ha podido determinar que los miembros de la familia Rb son importantes reguladores de la longitud telomérica en células de mamífero. Ha quedado también demostrada la conexión entre la regulación de la longitud telomérica con el control del ciclo celular. Es posible que los miembros de la familia Rb tengan un papel directo en la regulación de la longitud telomérica, independientemente de su intervención en el control del ciclo celular. Así, cuando se eliminan estas proteínas de la familia Rb, que en condiciones normales ponen freno a la división celular, las células no pueden pararse y se dividen indefinidamente. La rápida elongación telomérica que se ha observado en estas células podría estar ayudando al mantenimiento de su crecimiento inmortal.

MARTA GARCÍA-CAO y MARÍA A. BLASCO
Depto. de Oncología e Inmunología
Centro Nacional de Biotecnología-CSIC

Apoptosis

Mecanismos moleculares

La muerte forma parte de la vida. Esta simple frase describe una de esas paradojas que no por habituales nos resultan más comprensibles y aceptables. Y sin embargo, esta imbricación va más allá de la alternancia entre la vida y la muerte. Así, en la ontogénesis de cada ser vivo pluricelular, la muerte de ciertas células es necesaria en determinadas circunstancias. Acaso el ejemplo más repetido sea el de la construcción de una mano. Producir una mano requiere la muerte de las células que en su primer esbozo ocupaban el espacio comprendido entre lo que finalmente serán nuestros dedos.

Además, todo ser vivo debe desembarazarse de las células que a lo largo de su vida han ido acumulando

mutaciones y errores susceptibles de convertirlas en la amenaza de un cáncer. Cualquier desarreglo que afecte a la capacidad de morir de estas células puede tener consecuencias letales.

A la muerte de una célula se llega por diferentes vías. Cuando un tejido resulta dañado, por ejemplo en una herida, las células de la zona afectada mueren súbitamente, perdiendo su integridad y liberando en el entorno su contenido. Este tipo de muerte, llamado necrosis, perjudica a las células vecinas y en los animales desata una respuesta inmunitaria, a veces desproporcionada, que conduce a una lesión.



Estructura de la proteína AIF

Junto a esa muerte celular violenta, existe la requerida por el propio organismo para su desarrollo y bienestar. Debe hallarse ésta, pues, sometida a un control más estricto que el observado en la necrosis. Esta muerte celular controlada no conduce a la explosión de la célula moribunda, sino a su implosión, habitualmente seguida por su ingestión por células del sistema inmunitario, los macrófagos. Se trata de la *muerte celular programada* o *apoptosis*. El término apoptosis fue acuñado en 1972 por John Kerr, Andrew Wyllie y Alastair Currie, a partir de la palabra griega que designa *caída*, en analogía con la caída de las hojas y en referencia a su carácter natural.

Nos hallamos todavía lejos de comprender en toda su integridad los mecanismos desencadenantes de la apoptosis. No obstante, se va avanzando. Así, se han identificado señales externas, como la privación de factores de crecimiento, e internas, como la presencia de alteraciones en el ADN, que pueden provocar la respuesta apoptótica. Igualmente, se nos muestra con nitidez creciente que el control de esta respuesta pasa por diferentes orgánulos celulares y, muy en particular, por la mitocondria.

Las mitocondrias constituyen la factoría que produce la energía de la célula. Cualquier desarreglo en su funcionamiento conduce a la desregulación de los mecanismos celulares; de ahí su posición central en la apoptosis. En respuesta a señales como las mencionadas, la mitocondria deja de producir eficientemente energía y libera una serie de moléculas que, fuera de su contexto, se convierten en desencadenantes de la apoptosis. Una de estas moléculas es el citocromo c, proteína crucial en la respiración. Una vez en el citoplasma, el citocromo c desata la vía de las caspasas, así llamada por el papel clave que en la misma desempeñan estas proteínas.

La mitocondria puede liberar también el factor inductor de la apoptosis (AIF), una proteína que presenta otra característica en común con el citocromo c: ambas poseen una actividad oxidorreductora, esto es, capacidad de transferir electrones entre distintas moléculas. Sin embargo, a diferencia de lo que sucede con el citocromo c, se desconoce la función de AIF en la mitocondria; se ignora, además, el mecanismo por el que AIF induce una respuesta apoptótica.

Sí se sabe, en cambio, que la actividad apoptótica de AIF pasa por su transporte al núcleo. Tal actividad es independiente, al menos en parte, de la vía de las caspasas. Esta última cualidad parece responsable de que algunos autores, identificando apoptosis con vía de las caspasas, no consideren AIF como una proteína implicada en la apoptosis.

Hace unos meses nuestro equipo publicó en *Nature Structural Biology* la estructura del AIF de ratón. En biología, la estructura puede dar pistas acerca de la función. AIF está emparentada, desde el punto de vista evolutivo, con una familia de oxidorreductasas bacterianas. En las bacterias, estas proteínas se hallan implicadas en el procesamiento de moléculas potencialmente tóxicas. La estructura de AIF revela un gran parecido con estas oxidorreductasas bacterianas, lo que sugiere un papel similar en la mitocondria, tal vez reconvertida en neutralizador de radicales libres.

Adentrándonos más en el terreno de la hipótesis, cabe resaltar que en la mitocondria hay moléculas homólogas a las proteínas con las que interactúan estas oxidorreductasas bacterianas. Es más, estos homólogos mitocondriales, las ferredoxinas de tipo Rieske, son, como el citocromo c, esenciales en la respiración mitocondrial. Sin embargo, nadie ha probado todavía la interacción de AIF con las proteínas de la cadena respiratoria.

Una característica distingue a AIF de sus homólogas bacterianas: la presencia de un subdominio extremadamente rico en posibles dianas para los complejos mecanismos de señalización intracelular. Este subdominio (*en azul oscuro en la figura*), que en nuestra estructura fue capturado en una conformación muy peculiar, constituye, presumimos, el centro de control de la actividad de AIF.

La estructura de AIF constituye un paso importante en la elucidación de su compleja función, algo sin duda imprescindible para comprender la interrelación entre las diferentes vías de la respuesta apoptótica. Un paso más para entender cómo la muerte esculpe y hace posible la vida.

MIGUEL ORTIZ LOMBARDÍA
y MARÍA JESÚS MATÉ PÉREZ
Unidad de Bioquímica Estructural
Instituto Pasteur, París

De cerca

Texto y fotos: Josep-Maria Gili, Neus Vert, Cristina Linares, Sergio Rossi y José-Manuel Fortuño

Coincidencia estructural

Cuando se habla de bosques marinos la imagen que nos viene de inmediato son las praderas de fanerógamas o de macroalgas. Pero, a una mayor profundidad, cuando el nivel de extinción es inferior al 5 % de la luz incidente en la superficie del mar, la irradiancia no permite el desarrollo del modelo de vida basado en la obtención de energía lumínica a través de la fotosíntesis. A estas profundidades, a unos 15 m en el Mediterráneo, se desarrollan un tipo de estructuras y colonias animales que conforman bosques que extraen su energía por medio de la captura de presas, como un modelo de vida heterotrófico.

Los organismos marinos que mejor representan este segundo modelo son las gorgonias. Crecen fijas al sustrato rocoso mediante una base formada por una especie de raíces adherentes. Toman formas arbustivas con un eje central de consistencia leñosa en el que se pueden observar un sistema de anillos de crecimiento como el que generan los árboles. Los anillos señalan episodios de crecimiento, generalmente anuales, debido a cambios en el metabolismo y dieta de árboles y gorgonias.



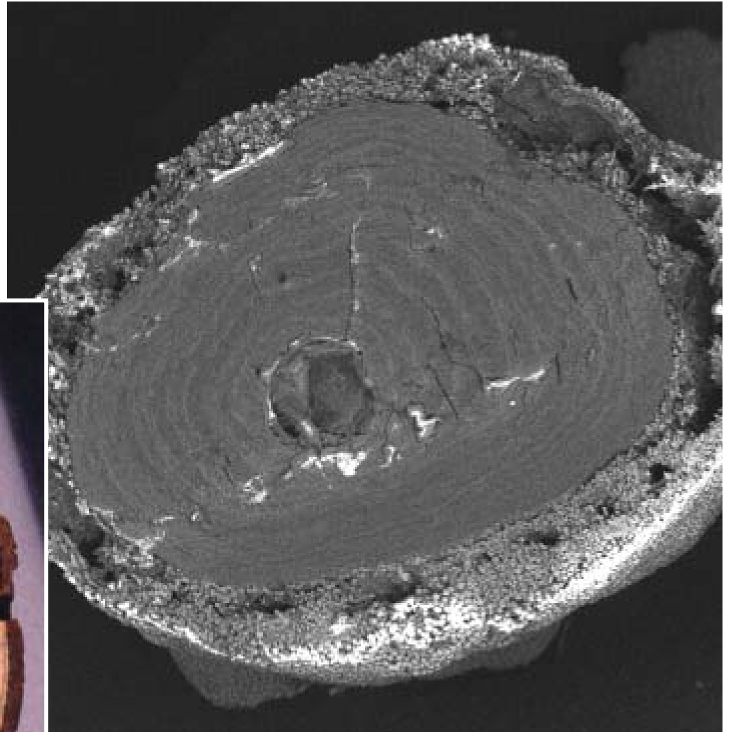
1. Gorgonias mediterráneas que adquieren a lo largo de su crecimiento una forma arbustiva

Cuando los árboles presentan alguna carencia nutritiva reducen la capacidad de formar hojas e incrementan el potencial de crear tejido leñoso. Este mismo fenómeno se puede atribuir a las gorgonias; cuando sufren una crisis trófica, los pólipos (equivalentes a las hojas de los árboles) se cierran y dejan de alimentarse, hecho que queda de manifiesto en los anillos de sus ejes centrales. Al igual que en los árboles, por el interior de este eje central, circulan los alimentos ingeridos de una parte de la gorgonia hacia otras, como las apicales, que son las que crecen con mayor rapidez. Esta coincidencia estructural entre gorgonias y árboles permite que se puedan aplicar técnicas muy comunes en los bosques. Si la repoblación forestal suele hacerse a partir de esquejes arrancados de árboles mayores, en las gorgonias recientemente se ha demostrado que se pueden repoblar las poblaciones naturales mediante trasplantes de fragmentos de otras gorgonias.



2. Un bosque mediterráneo común de pinos

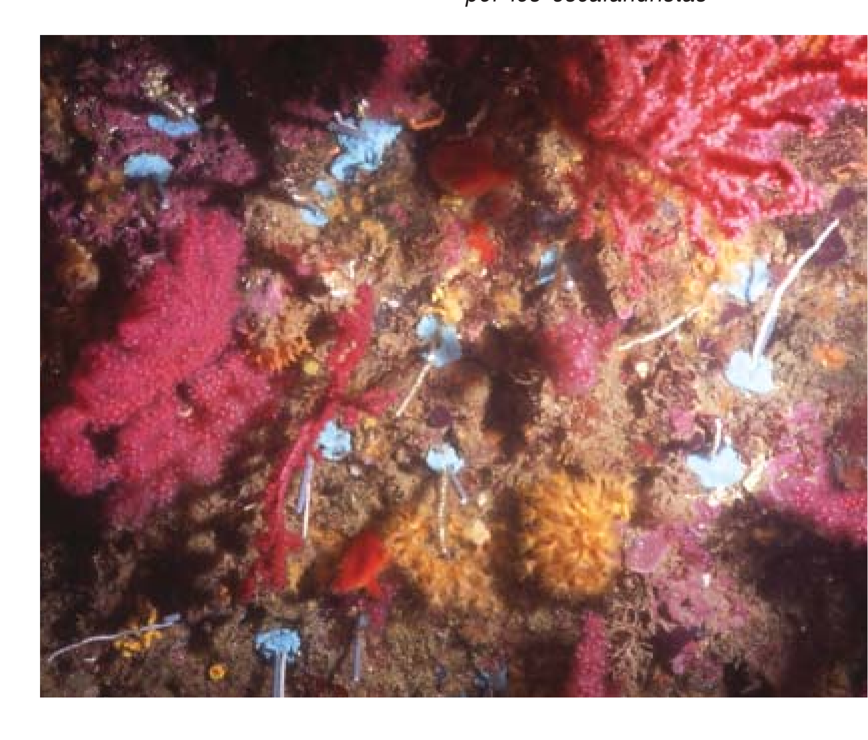
3 y 4. Corte transversal de una gorgonia (derecha) *y de un árbol* (abajo), *en los que se aprecian los anillos de crecimiento*





5. Trasplantes de gorgonias mediterráneas para regenerar la población deteriorada por los escafandristas





6. Ejemplo de repoblación de un bosque mediterráneo en el que se sigue un modelo de sembrado, no muy distinto del que se sigue con la repoblación de bosques de gorgonias

La astronomía griega y la tradición árabe medieval

Los astrónomos islámicos de la Edad Media no se limitaron a traducir los textos clásicos. Podrían haber incluso desempeñado un papel clave en la revolución copernicana

George Saliba

En 1957, dos brillantes historiadores se reunieron para estudiar un manuscrito astronómico de un autor árabe del siglo XIV. El documento, cuyo contenido parecía increíble, era desconocido para la mayoría de los historiadores de la ciencia. Lo había escrito Ibn al-Shāṭir, *muwaqqit* de la mezquita Umayyad central de Damasco. El texto redactado por el encargado del cómputo del tiempo, así debe entenderse el oficio de al-Shāṭir, adelantaba ideas de la teoría de Copérnico. Y ello, más de cien años antes del nacimiento del astrónomo polaco.

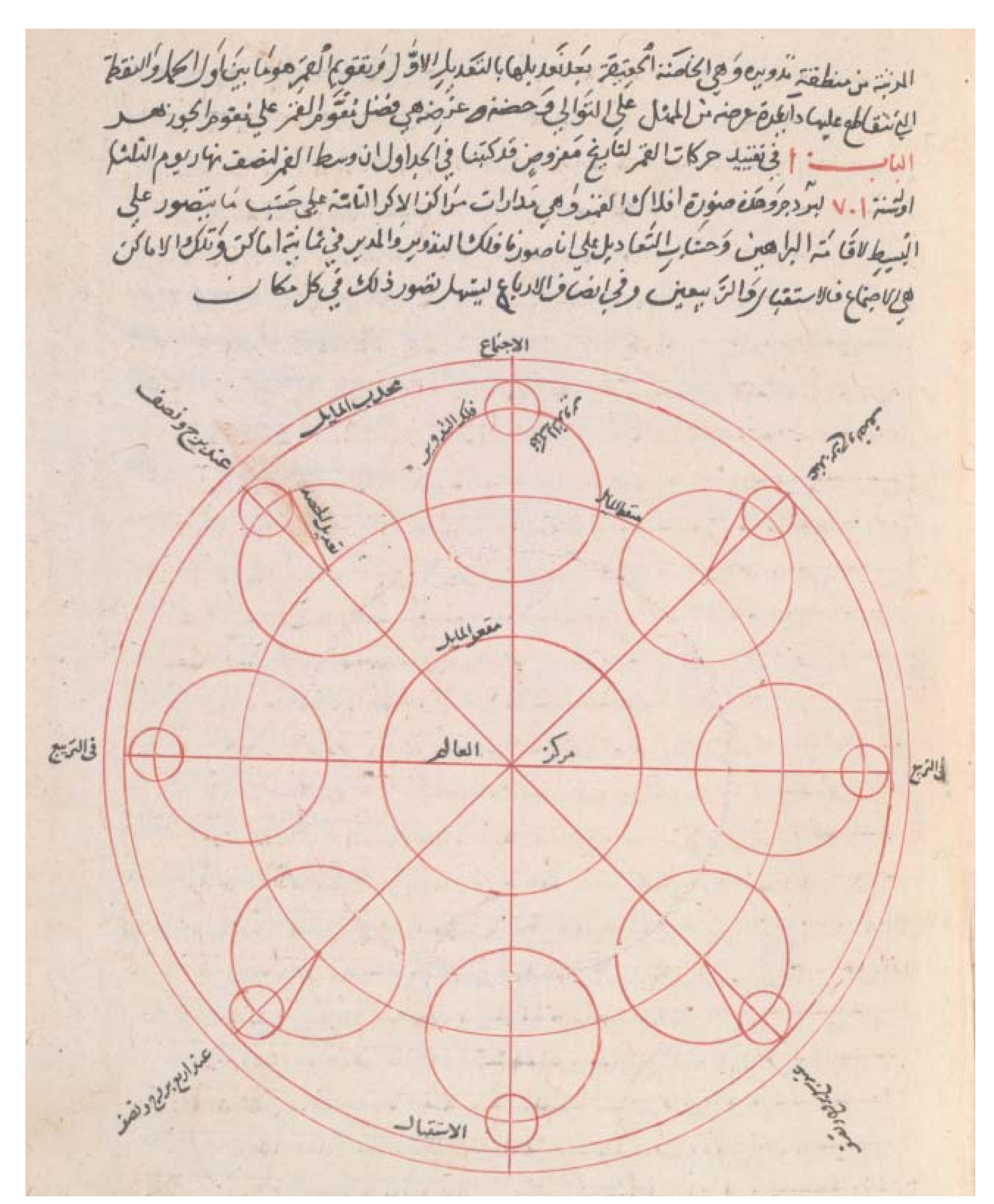
Cuando los dos historiadores presentaron el escrito de Ibn al-Shāṭir, las respuestas que recibieron oscilaron entre la incredulidad absoluta y el rechazo no menos absoluto. Los hubo que abandonaban la sala de conferencias si el ponente mencionaba el manuscrito. La razón del desasosiego residía en que abría la puerta a la hipótesis de que Copérnico no estuvo sólo en la creación de su teoría astronómica. Para unos, Copérnico había llegado al mismo punto de Ibn al-Shāṭir por un camino propio; el asunto constituía un caso más de convergencia, de "descubrimiento independiente". Sin embargo, con el tiempo resultó claro que había algún tipo de conexión entre los trabajos de Copérnico y los de los astrónomos islámicos medievales, que había pasado inadvertida. La revelación del trabajo de Ibn al-Shāṭir evidenciaba asimismo que el Renacimiento, inspirado en parte en la revolución copernicana, no era un fenómeno europeo exclusivo.

Se ponía en cuestión lo que, en el mejor de los casos, no es más que una caricatura de la historia: la entrega de la "antorcha" del saber de las manos de los griegos de la antigüedad clásica a la Europa cristiana medieval a través de los árabes. De acuerdo con esa visión esquemática, los intermediarios se limitarían a transcribir y traducir los textos de astronomía, filosofía y medicina griegos hasta que Europa despertó de su letargo, asimiló los libros y enarboló de nuevo la antorcha. Semejante cuadro del pasado no concede a la civilización islámica el papel que le corresponde en la revolución científica; subestima, además, la relación, a menudo profunda, que se establece entre culturas y movimientos intelectuales distintos.

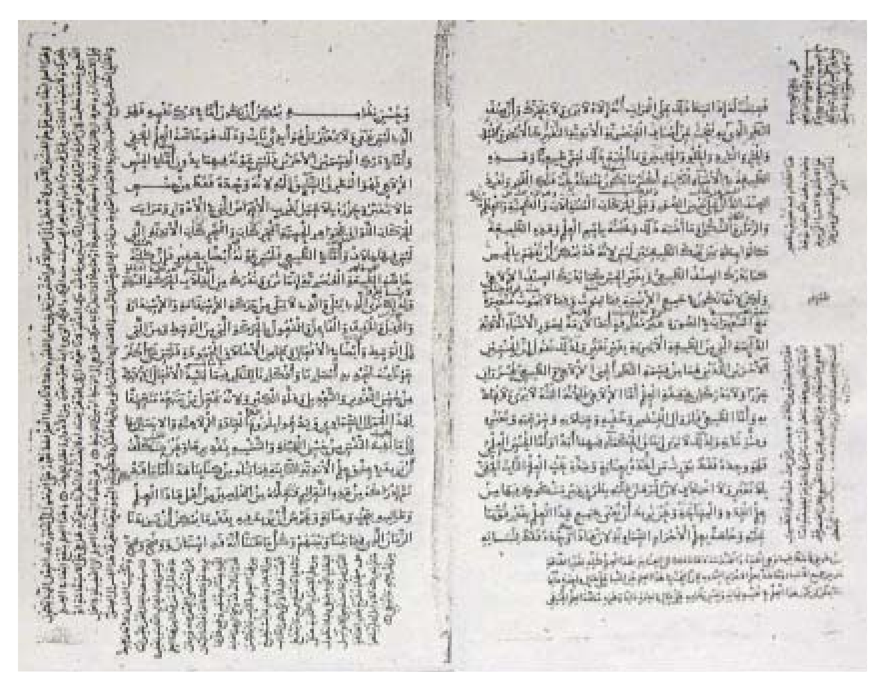
¿Qué aportaron los astrónomos islámicos? ¿Qué parte de su saber se transmitió a Europa, sin que ésta reco-

El autor

GEORGE SALIBA, profesor de ciencia árabe e islámica en la Universidad de Columbia, ha centrado su interés investigador en el desarrollo de las teorías planetarias y su transmisión a la Europa del Renacimiento.



1. TRAYECTORIA DE LA LUNA a través del firmamento, según el modelo propuesto por Ibn al-Shāṭir, astrónomo árabe del siglo XIV. Es idéntico al ofrecido por Copérnico casi dos siglos más tarde. El astrónomo polaco no atribuyó el origen de este modelo a Ibn al-Shāṭir, ni tampoco reconoció que otros árabes le habían precedido en determinados conceptos sobre el movimiento de los planetas que introdujo en su cosmología heliocéntrica. La esfera de la Luna se halla sobre la circunferencia rotante del círculo menor. Se la muestra en ocho posiciones a lo largo de su trayectoria orbital alrededor de la Tierra. El modelo de Ibn al-Shāṭir mejoró la descripción que Ptolomeo había dado del movimiento de la Luna, en el siglo segundo de nuestra era.



CORTESIA DE THE BRITISH MUSEUM

2. LAS TRADUCCIONES ARABES del *Almagesto* de Ptolomeo, tal como lo muestran los comentarios escritos en los márgenes de estas páginas, aparecían densamente comentadas. Los escritos de Ptolomeo se sometieron a una crítica severa desde los inicios de su introducción en el mundo islámico en el siglo IX.

nociera tal deuda? No es tarea fácil reunir todas las piezas de la historia. Hay miles de textos árabes sobre ciencia en las bibliotecas importantes de casi todo el mundo, desde Dublín hasta Madrás. En su mayoría, lo mismo que el manuscrito de al-Shāṭir, ignorados por los expertos. Mas de lo recuperado emerge una nueva imagen: frente a la tesis tradicional (la civilización islámica aceptó a pies juntillas el pensamiento astronómico griego en bloque), se ha de afirmar que los astrónomos islamistas cuestionaron numerosos puntos del legado clásico y se esforzaron en crear una nueva astronomía propia. Algunas de tales innovaciones serían, andando el tiempo, adoptadas por Copérnico. Otro autor que emprendió su propia revolución contra la astronomía griega.

Problemas de la visión ptolemaica

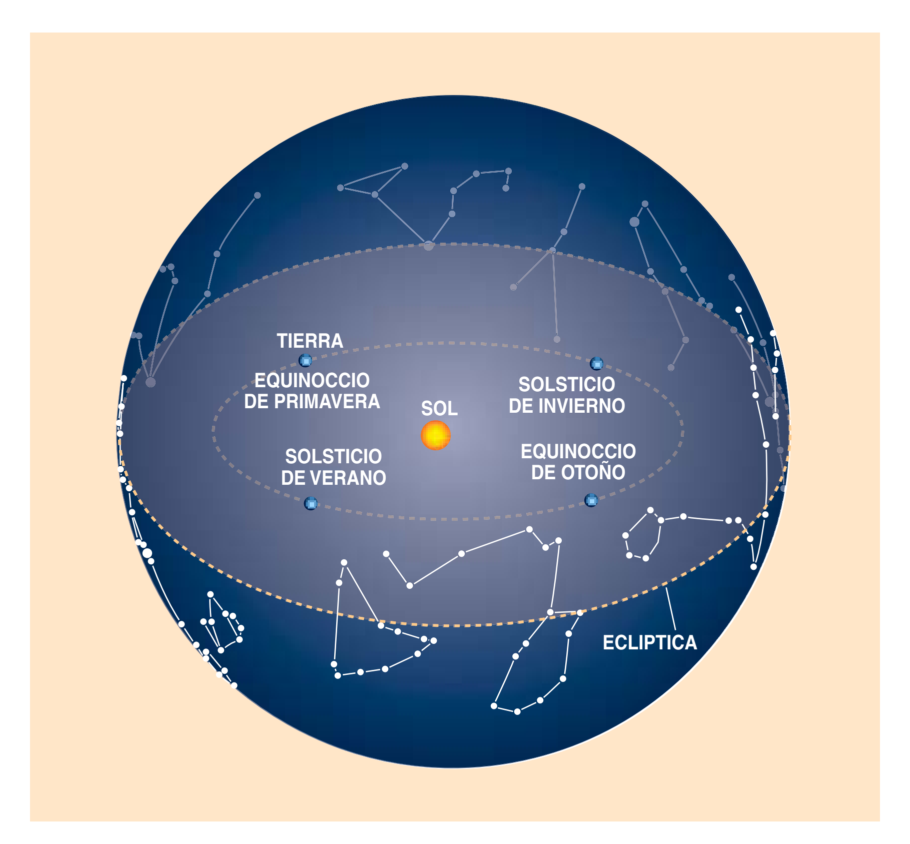
Cuando hablamos de astronomía griega nos viene a la mente el nombre de Ptolomeo de Alejandría. Este autor del siglo II d.C., compiló la astronomía de su tiempo en tres obras que ejercerían una influencia perdurable: el *Almagesto,* las *Hipótesis sobre los planetas* y las *Tablas de Mano*. Transcurrieron siete siglos antes de que los escritos de Ptolomeo llegaran al mundo islámico, un intervalo temporal bastante gris para la historia de la ciencia.

El interés repentino que su obra despierta en el siglo IX cabe atribuirlo, en parte al menos, a la rápida expansión del Islam. Los territorios recién conquistados generaron necesidades administrativas de unas proporciones sin precedentes, que, a su vez, requerían elevados niveles de desarrollo científico y técnico. Los escritos de Ptolomeo ofrecían a los pueblos islámicos una geometría que les servía para predecir los movimientos del Sol, de la Luna y de los planetas en relación con las estrellas "fijas". Se trataba de herramientas muy útiles para, entre otras cosas, confeccionar un calendario lunar preciso, fijar los horarios de las plegarias diarias y, por supuesto, determinar la orientación sagrada (la *qibla*) hacia La Meca desde tierras lejanas.

Se embarcaron en un gigantesco trabajo de traducción, acometido en distintos centros y bajo el auspicio de varios mecenas; por encima de todos destacó la Casa de la Sabiduría, fundada en Bagdad con ese propósito. A su debido tiempo, algunas de esas traducciones al árabe llegaron de nuevo a Europa a través de España; se tradujeron al latín, posibilitando su estudio en el mundo occidental cristiano. Algunos textos griegos (el *Almagesto*, por ejemplo) se conservaron a través de la Edad Media, pero otros se hubieran perdido para siempre de no haber sido por las traducciones al árabe. Merced a esas versiones se salvó una parte importante del legado clásico. Pero, desde el propio principio, los traductores árabes no se limitaron a la traslación escueta. Corregían errores y comentaban textos. Algunos fallos —transcripciones equivocadas de los textos griegos— carecían de mayor trascendencia; otros errores, sin embargo, resultaban más inquietantes.

Si se pretendía aplicar esas obras a cuestiones prácticas, algunos de esos errores debían ser corregidos. Ocurría así con la frecuencia del movimiento de precesión. El eje de la Tierra oscila a lo largo del transcurso del tiempo; se comprueba por los cambios de la eclíptica, el movimiento aparente del Sol sobre el fondo de las estrellas. Para un arco temporal de setecientos años, las investigaciones de Ptolomeo predecían un desplazamiento de unos siete grados; los astrónomos de Bagdad midieron, en cambio, una variación de unos diez u once grados. Ptolomeo tampoco acertó en la inclinación precisa de la Tierra, es decir, la inclinación del plano ecuatorial en relación con la eclíptica. Los astrónomos del siglo IX calcularon un valor que se acerca más al hoy aceptado. Por último, Ptolomeo determinó una posición fija para el "apogeo solar", la distancia máxima entre el Sol y la Tierra en su "órbita geocéntrica". (Ptolomeo y los astrónomos árabes suponían que el centro del universo lo ocupaba la Tierra.) Pero los astrónomos islámicos observaron que el apogeo solar en realidad se había desplazado unos diez grados a lo largo de siete siglos; su movimiento era más o menos similar al movimiento de precesión.

Al tratarse de una cuestión práctica, los árabes encararon esos errores elaborando unas tablas astronómicas (efemérides) que resolviesen las necesidades cotidianas. Sin embargo, el reconocimiento de que Ptolomeo había cometido errores tan fundamentales propició que se plantearan preguntas de mayor calado a propósito del legado astronómico de los griegos. ¿Fueron responsables de los errores de Ptolomeo los instrumentos que empleó? ¿Siguió tal vez métodos de observación equivocados? ¿O quizás había algo más? Estas preguntas generaron un clima que propiciaba la criba rigurosa de cada detalle de la tradición astronómica griega.



3. TRAYECTORIA DE LA TIERRA alrededor del Sol. Su curso provoca ilusiones ópticas que deben explicarse en un universo geocéntrico. A lo largo de un año, el Sol parece moverse por el cielo como si siguiese un camino, la eclíptica, que pasa por las doce constelaciones del zodíaco (*figuras blancas*). Los dos solsticios señalan los momentos del año en que el eje de la Tierra se inclina más hacia el Sol o en sentido opuesto. Los equinoccios señalan los dos puntos en que el ecuador celeste (la proyección del plano del ecuador de la Tierra en el espacio) corta la eclíptica. Los astrónomos griegos y los árabes del Medievo intentaron explicar esos fenómenos con modelos en los que se suponía que el universo era geocéntrico.

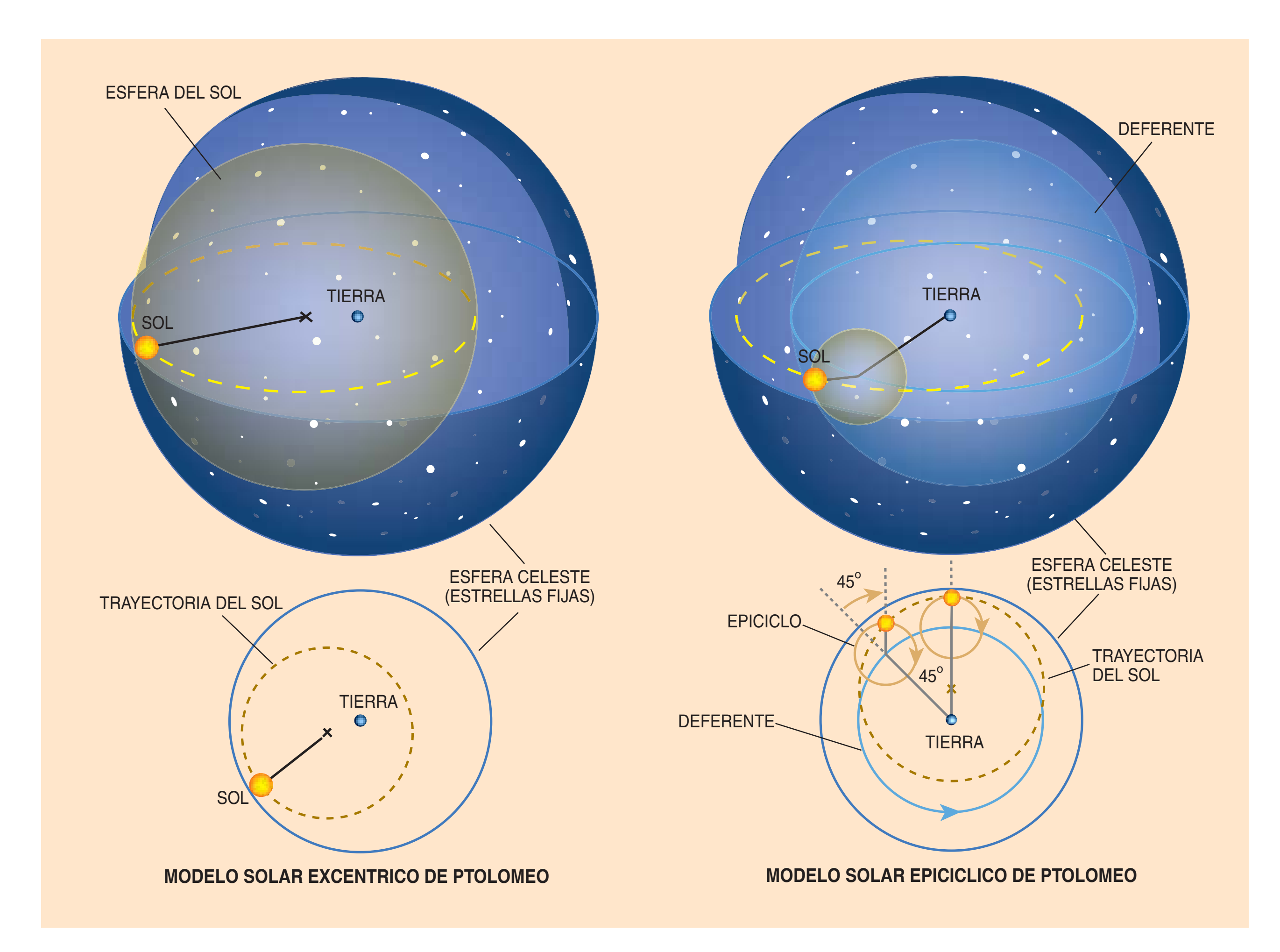
Las grandes preguntas

Los astrónomos teóricos consiguieron librarse de algunos de los problemas que condujeron a los errores ptolemaicos. Descubrieron, por ejemplo, que las técnicas de observación del alejandrino dejaban mucho que desear. Los cálculos de Ptolomeo de la excentricidad del Sol (una forma de caracterizar su "órbita" aparente) y de la posición del apogeo solar no eran correctos porque observó el Sol en los dos equinoccios y los dos solsticios. El inconveniente estriba aquí en lo siguiente: en la segunda mitad de junio y de diciembre el Sol, durante algunos días, sale y se pone en el mismo punto del horizonte, de modo que es muy difícil determinar con exactitud cuándo se produce el solsticio. Los astrónomos islámicos se dieron cuenta de que podían realizarse observaciones más exactas a mitad de las estaciones, cuando el Sol pasa por los puntos intermedios de Tauro, Leo, Escorpión y Acuario. De un solo golpe, superaron a Ptolomeo y resolvieron los problemas del apogeo y la excentricidad del Sol.

Los teóricos mostraron también un profundo interés por los cimientos cosmológicos de la astronomía ptolemaica. El alejandrino adoptó la cosmología de Aristóteles, que defendía la incrustación de planetas y estrellas en esferas celestes concéntricas en torno a la Tierra. Se suponía que esferas y cuerpos celestes estaban hechos del mismo "elemento" simple: el éter. A diferencia de los demás elementos —la tierra, el fuego, el agua y el aire—, el éter era perfecto y divino; carecía de propiedades terrestres tales como la fricción. A primera vista todo eso parecía coherente. Ptolomeo aceptó los elementos de Aristóteles sin cuestionarlos.

Los problemas empezaban cuando el alejandrino abordaba la mecánica celeste dentro del marco de la cosmología aristotélica. Ptolomeo propuso que una novena esfera, la más exterior, era la responsable del movimiento diario de su vecina, la octava esfera, sustentadora de las estrellas fijas; de ese modo explicaba el fenómeno de la precesión. Muḥammad b. Mūsā, en el siglo IX, reflexionó sobre la novena esfera ptolemaica y se dio cuenta de que, lisa y llanamente, no podía haber tal cubierta. ¿Cómo iba a mover una esfera sin fricción a otra esfera sin fricción, si ambas giraban alrededor del mismo centro?

Se desencadenó un debate filosófico entre los estudiosos islámicos. ¿En qué consistía el éter? ¿Cuál era la verdadera naturaleza de las esferas? ¿Era posible que los cuerpos celestes tuvieran propiedades que contradecían la naturaleza que originalmente los definía? En cierto modo, la búsqueda de la coherencia entre la definición original de los cuerpos celestes y sus propiedades aparentes se convirtió en la principal preocupación de la astronomía islámica. Tal vez resida ahí la diferencia fundamental entre



4. PTOLOMEO PROPUSO DOS MODELOS GEOCENTRICOS para explicar el movimiento del Sol, que, durante parte del año, parecía disminuir velocidad, lo que hacía pensar que, en esos períodos, el Sol se encontraba más alejado de la Tierra. En su modelo "excéntrico" (*izquierda*) presupuso que el centro de la Tierra no coincidía con el centro de la esfera que arrastraba al Sol. En su modelo "epicíclico" (*derecha*) imaginó la existencia de una esfera portadora, el *deferente*, cuyo centro coincidía con el de la Tierra, pero colocó el Sol en otra esfera, *epiciclo*, a la que arrastraba la esfera deferente. Es más fácil entender la acción del modelo epicíclico (*derecha abajo*) si consideramos el movimiento del deferente y el del epiciclo en dos pasos. En primer lugar, imaginemos que el deferente arrastra el epiciclo 45 grados en sentido antihorario. A continuación el epiciclo gira, en sentido horario, los mismos grados. Cuando el deferente haya dado una vuelta completa, la combinación de esos dos movimientos habrá descrito la trayectoria del Sol alrededor de la Tierra (*línea marrón*).

los astrónomos islámicos y sus predecesores griegos.

Una vez establecida esta línea de reflexión, los árabes se dieron cuenta de que la astronomía griega estaba preñada de disparates cosmológicos. Debían, pues, reformar esa astronomía y crear una nueva, exenta de contradicciones. Las cuestiones cosmológicas que más preocupaban a los astrónomos islámicos admitían un enunciado sencillo. Resolverlas era harina de otro costal. Se necesitaron, en primer lugar, generaciones de astrónomos para articular los problemas de la forma adecuada y todavía más generaciones para luego resolverlos. Así fue forjándose una astronomía distinta, de la que se beneficiaría la copernicana.

No deberíamos precipitarnos en calificar de ingenuos a Ptolomeo y a sus discípulos por no haberse liberado de las ideas aristotélicas sobre las esferas y el universo geocéntrico. Los resultados observacionales que proporcionaba esa cosmología, equivocada o no, eran excelentes y permitían predecir las posiciones de los planetas en cualquier momento y en cualquier lugar. Antes de la ley de gravitación universal de Newton, en el siglo XVII, no había otra cosmología que explicase tanto del universo observable y tan sistemáticamente.

Todo son esferas...

En algún grado, Ptolomeo tenía que ser consciente de las dificultades que conllevaba una adhesión estricta a la cosmología aristotélica. No le era posible explicar ni los movimientos planetarios más simples sin incumplir alguna de las restricciones de Aristóteles. Consideremos el movimiento del Sol. Si la Tierra ocupase el centro de la esfera celeste, entonces el Sol se

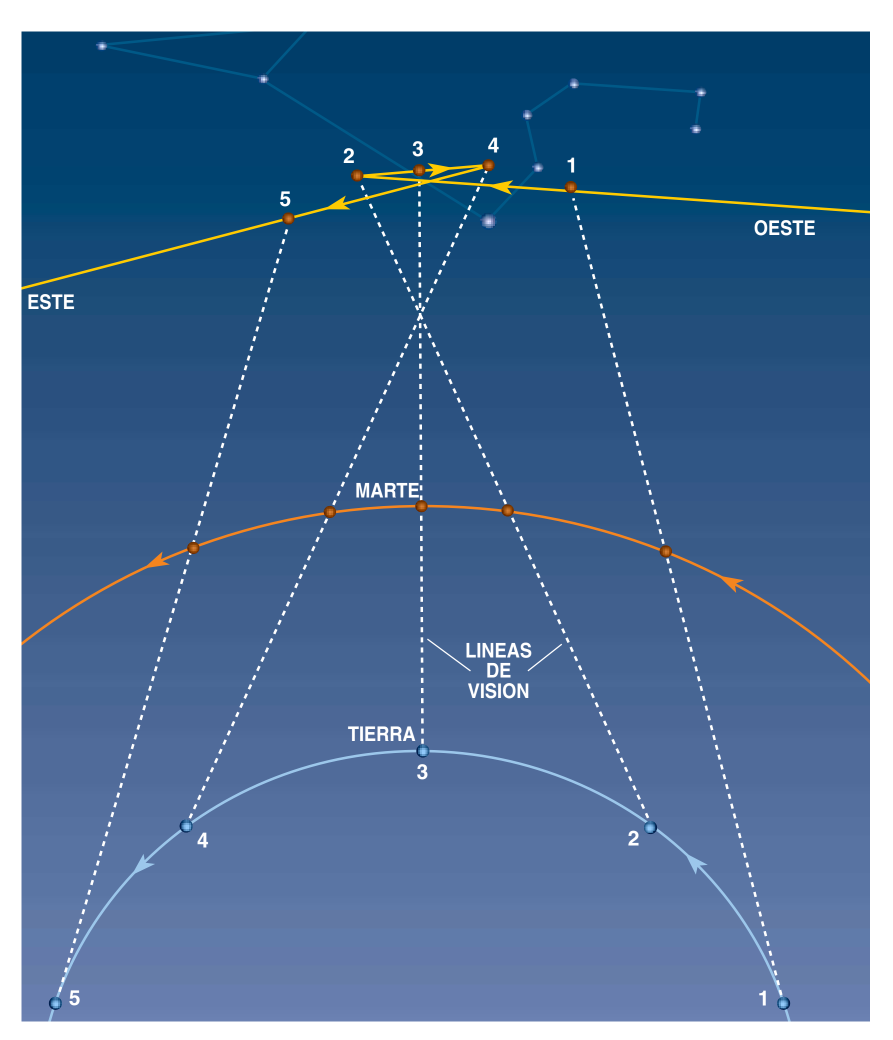
movería por el cielo a una velocidad uniforme durante todo el año, porque no variaría la distancia que nos separaría del astro. Pero eso no es lo que ocurre: en los meses de primavera y verano, en el hemisferio norte, el Sol parece avanzar más lentamente de lo que lo hace durante el otoño y el invierno. (Sabemos ahora que la primavera y el verano son más largos que el otoño o el invierno porque la Tierra está más lejos del Sol durante esos meses, de modo que tarda más en viajar de un equinoccio al otro.)

Ptolomeo aborda este problema en el *Almagesto III* (el tercero de trece libros), donde da a elegir a sus lectores entre dos modelos que pretenden explicar la razón por la que unas estaciones duran más que las otras. En su modelo excéntrico proponía que el centro de la Tierra no coincidía con el centro de la esfera que arrastraba al Sol en su curso anual. Puesto que el Sol orbitaba alrededor de la Tierra, parecía, en consecuencia, estar más lejos (y moverse más lentamente) durante parte del año. En su modelo epicíclico, supuso la existencia de una "esfera portadora", posteriormente llamada deferente, que era concéntrica con el centro de la Tierra; colocó el Sol en otra esfera, llamada epiciclo, a la que arrastraba la esfera deferente y cuyo radio era igual a la excentricidad del primer modelo. Como epiciclo y deferente se movían a la misma velocidad, aunque en sentido opuesto, el Sol, situado sobre la superficie del epiciclo, describía un círculo cuyo diámetro igualaba la diferencia entre la posición del Sol más cercana a la Tierra y la más lejana.

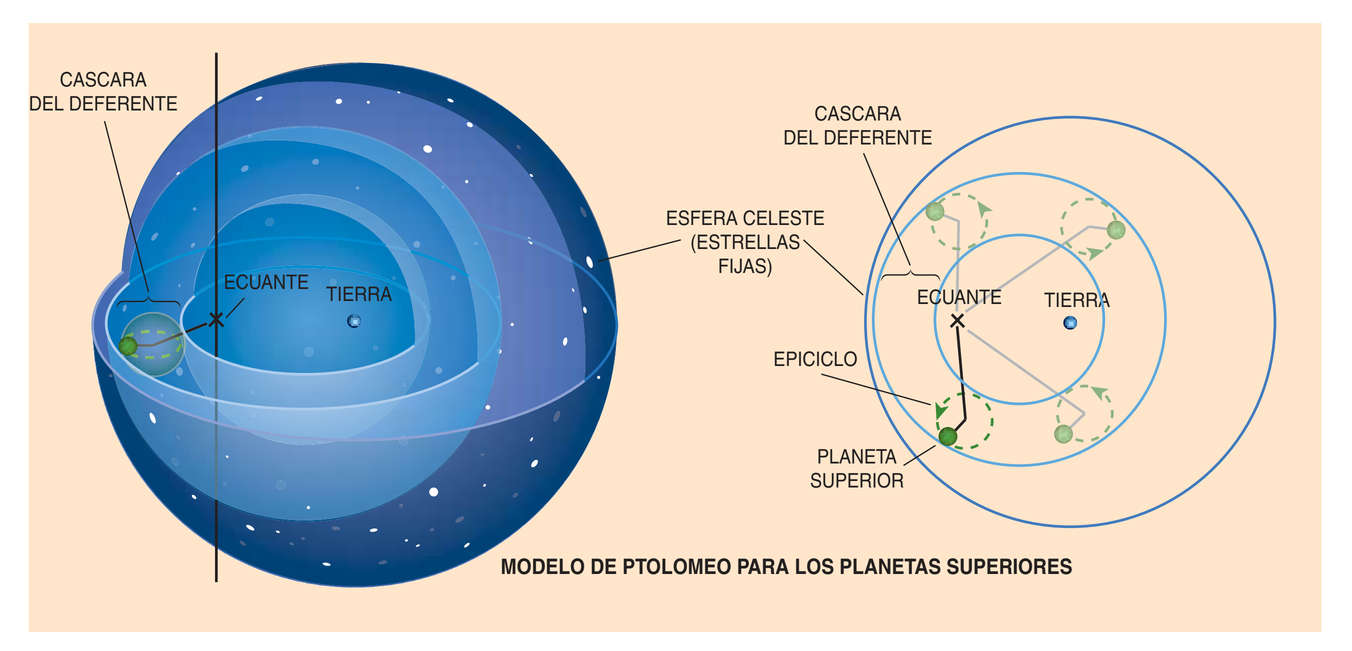
Ambos modelos permitían por igual explicar el curso aparente del Sol. Al elegir, Ptolomeo optó por el axioma clásico de simplicidad y se inclinó por el modelo excéntrico; por una razón de economía: sólo requería una esfera. Lo que no dijo, sin embargo, es que ambos violaban la cosmología aristotélica. En el modelo excéntrico, la Tierra no era el centro de la "pesantez", y eso contradecía la tesis aristotélica de una Tierra en el mismo centro del universo. Por otro lado, en el modelo del epiciclo se admitía la existencia de una esfera epicíclica que tenía su propio centro de pesantez y que no se movía por sí misma, sino arrastrada por el movimiento de la esfera deferente. Todo esto entraba en conflicto con la simplicidad del éter y creaba un centro de pesantez a extramuros de la Tierra.

Ptolomeo no entraba en la justificación de tales violaciones y dejaba entender al lector que se trataba de transgresiones sin relevancia. A finales del siglo XII, algunos árabes andalusíes abordaron el problema, en particular las transgresiones en cuestión. El resto del mundo islámico, sin embargo, secundó el silencio de Ptolomeo. Al fin y al cabo, los modelos del alejandrino permitían establecer predicciones de una precisión aceptable.

Ese silencio se rompió el siglo XIV. Ibn al-Shāṭir afirmó en Damasco que el modelo excéntrico violaba la cosmología de Aristóteles y debía abandonarse. Ibn al-Shāṭir, tras desterrar todos esos modelos de su propia astronomía geocéntrica, tomó un rumbo interesante: cuestionó la naturaleza del éter de Aristóteles. Si el firmamento entero estaba hecho de éter —las esferas, los planetas y las estrellas—, ¿cómo explicar que las estrellas emitieran luz y no brillaran las esferas que las portaban? Ibn al-Shāṭir concluyó que el éter tenía que ser un compuesto (*tarkībun mā*); no podía ser tan simple como se había admitido hasta entonces.



5. EL MOVIMIENTO APARENTE (***línea amarilla***) **de un "planeta superior", como Marte, en relación con las "estrellas fijas" incluye un movimiento retrógrado (del este al oeste) cuando la Tierra sobrepasa al "planeta superior" en la "vía interna" de sus respectivas órbitas en torno al Sol. Ptolomeo inventó extraños modelos geocéntricos para explicar ese comportamiento (*véase la figura 6*).**



6. EL MODELO CON QUE PTOLOMEO explicaba el movimiento de los planetas superiores implicaba una construcción sin sentido físico que inquietó profundamente a los astrónomos árabes. Ptolomeo proponía que una esfera portadora, o deferente (*azul claro*), giraba *sin cambiar de lugar* alrededor de un eje que pasaba, no por el centro de la esfera, sino por "el centro de la ecualización del movimiento" (más tarde llamado "ecuante"). Ese movimiento es físicamente imposible, y no se llegó a una solución del problema hasta el siglo XIII, gracias al astrónomo Mu'ayyad al-Dīn al-'Urḍī. Copérnico empleó el teorema de 'Urḍī en sus modelos explicativos del movimiento de los planetas. En este gráfico el planeta está incrustado en un epiciclo que se mueve por el interior del deferente.

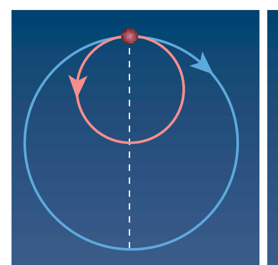
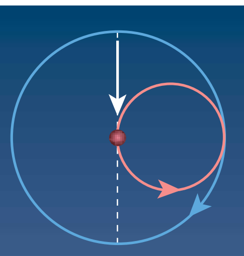
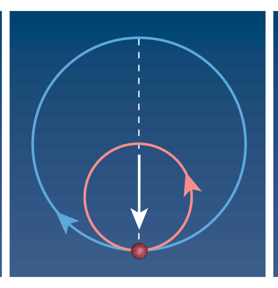
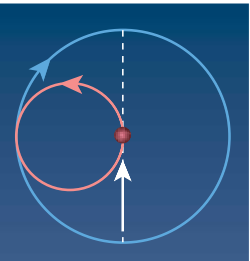
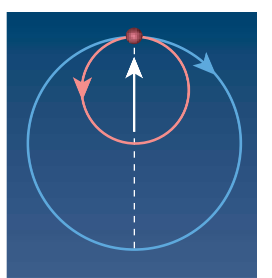
Argumentaba que, si ese tipo de compuesto podía aceptarse en el firmamento, entonces los epiciclos también debían tolerarse, puesto que incluso el tamaño del mayor de los epiciclos planetario no podía compararse con la estrella fija más insignificante. Al incluir los epiciclos, Ibn al-Shāṭir consiguió construir modelos totalmente geocéntricos compatibles con su nueva visión de la cosmología aristotélica, con las observaciones de Ptolomeo y con las de astrónomos posteriores, más refinadas.

Si los modelos ptolemaicos sobre el curso del Sol pueden parecernos forzados, lo son todavía más sus configuraciones planetarias. Saturno, Júpiter, Marte y Venus siguen trayectorias extrañas: en ocasiones parecen moverse más despacio, de vez en cuando se detienen o incluso emprenden un movimiento retrógrado en relación con las estrellas. Para explicar esos movimientos Ptolomeo se vio obligado a abandonar la simplicidad y a incorporar la esfera excéntrica y la epicíclica. (Sus descripciones del movimiento de la Luna y de Mercurio revisten incluso mayor complejidad.)

En esos modelos combinados, Ptolomeo supuso, para cada planeta, la existencia de una esfera excéntrica (el deferente) cuyo grosor posibilitara transportar, en el interior de su estructura, similar a un caparazón, a un epiciclo sólido. A su vez, el planeta estaba engastado en la superficie del epiciclo. El alejandrino no se pronunció tampoco sobre estas violaciones, pese a que la situación era todavía peor desde el punto de vista cosmológico. A diferencia de lo que ocurría en su modelo sobre el curso del Sol, el epiciclo y el deferente ya no se movían a la misma velocidad. Era el movimiento del epiciclo el que daba cuenta del movimiento del planeta. Puesto que la trayectoria seguida por el planeta era independiente del movimiento descrito por el deferente, ya no podía usarse para esconder la violación de la excentricidad, como se había hecho en el caso del Sol.

Quizás el aspecto más enojoso de ese modelo era que los deferentes de los planetas no se movían alrededor de sus centros. Según Ptolomeo, giraban uniformemente, sin desplazarse, en torno a un eje que atravesaba "el centro de la ecualización del movimiento", lo que en tiempos medievales recibió el nombre de ecuante. La noción de ecuante fue "la gota que colmó el vaso" para algunos astrónomos islámicos: carecía de todo sentido físico. Intentemos imaginar una esfera que, sin moverse de sitio, gira sobre sí misma alrededor de un eje que no pasa por su centro (*véase la figura 6*).

Muchos astrónomos se esforzaron por resolver el problema del ecuante, entre ellos un alumno de Avicena, médico y filósofo famoso del siglo XI. Sólo lo consiguió, dos centurias después, Mu'ayyad al-Dīn al-'Urḍī, astrónomo de Damasco. Su teorema, conocido hoy por lema de 'Urḍī, reproducía los movimientos aparentes de los planetas con la ayuda de un deferente que se movía uniformemente y sin desplazarse alrededor de un eje que atravesaba su centro. Siglos más tarde, Copérnico empleó ese teorema para explicar las trayectorias pla-

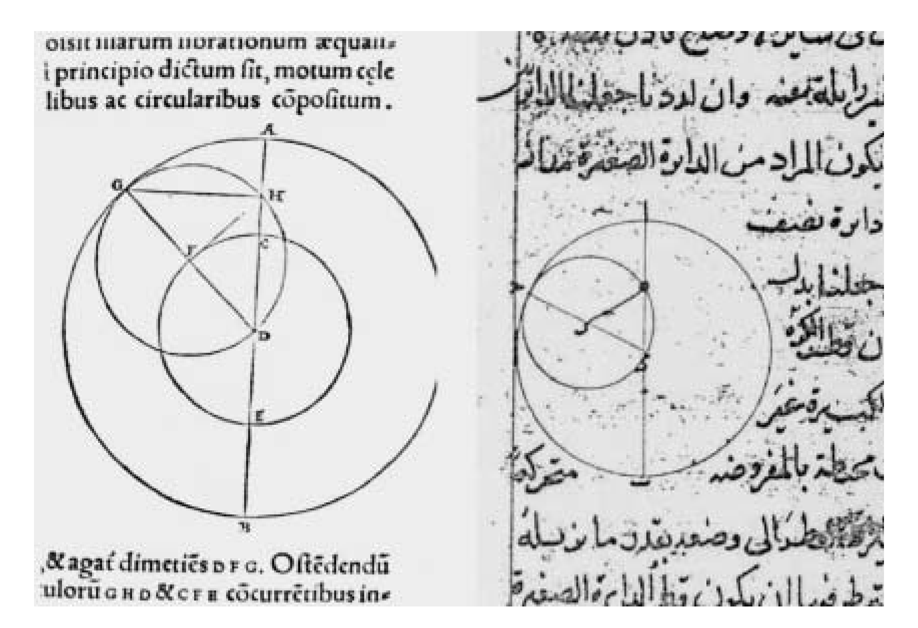
7. EL PAR de Ṭūsī genera un movimiento lineal (*línea blanca*) a partir de un movimiento circular uniforme (*círculo rosa y círculo azul*). Con ello resuelve muchos de los problemas que tanto preocupaban a los astrónomos de la antigüedad. Aquí el círculo azul arrastra el círculo rosa en sentido horario, mientras que el círculo rosa gira en el sentido contrario a las agujas del reloj en torno a su eje central. De los dos movimientos circulares resulta el movimiento lineal (*flecha blanca*) de un objeto (*bola roja*) a lomos del círculo rosa. El mecanismo, ideado por el astrónomo del siglo XIII Naṣīr al Dīn al-Ṭūsī, se empleó para explicar el movimiento en latitud de los planetas en las cosmologías geocéntricas, y cuenta todavía con un amplio abanico de aplicaciones.

netarias en su cosmología heliocéntrica.

El modelo de Ptolomeo explicaba el movimiento en "longitud" de los planetas por el cielo. El movimiento en "latitud" requería otro mecanismo. En el caso de Venus, por ejemplo, Ptolomeo supuso que el "plano ecuatorial" del deferente oscilaba arriba y abajo, en un movimiento de vaivén. Propuso un mecanismo consistente en dos círculos pequeños, perpendiculares al plano ecuatorial y que reposaban sobre su circunferencia. La medida de los circulitos se correspondía con la amplitud del movimiento en latitud del planeta; así, cuando el plano ecuatorial giraba sobre esos círculos describía un movimiento oscilante.

Pero ese mecanismo no funciona. Al sujetar los círculos a los extremos del diámetro ecuatorial del deferente se generaría un tambaleo que afectaría a los movimientos en longitud (que, si no fuera por ello, resultarían precisos). Huelga decir, además, que no hay modo de encajar todo esto en una cosmología aristotélica que propugna que todos los movimientos celestes son uniformemente circulares. En el firmamento no cabían oscilaciones. En palabras de Naṣīr al Dīn al-Ṭūsī, astrónomo del siglo XIII: "Ese modo de hablar resulta ajeno a nuestro oficio", una forma sutil de decir que la descripción de Ptolomeo carecía de sentido. Y parece que Ptolomeo se dio cuenta de ello. En su propia defensa, recurrió a la debilidad de los mortales que osaban intentar entender la mente de Dios: "No permitamos ahora que nadie, al considerar la complicada naturaleza de nuestros mecanismos, repute artificiosas tales hipótesis. Porque no es adecuado comparar las [construcciones] humanas con las divinas, ni fundamentar en analogías tan dispares nuestras creencias sobre cuestiones de tamaña importancia..."

Al final fue Ṭūsī quien aportó una solución para el problema del movimiento en latitud. Su brillante teorema consistía en dos esferas, una un semidiámetro de la otra e instalada tangencialmente en su interior (*véase la figura 7*). El mecanismo de Ṭūsī generaba un movimiento lineal a partir de un movimiento circular uniforme; acababa, pues, con la división de Aristóteles, durante tanto tiempo defendida, entre los mo-



8. LA PRUEBA DE COPERNICO del par de Ṭūsī (*izquierda*) es idéntica a la que empleó el propio Ṭūsī (*derecha*), incluyendo los signos alfabéticos que dan nombre a los correspondientes puntos del diagrama. Copérnico recurrió también el par de Ṭūsī para justificar el movimiento de Mercurio del mismo modo en que lo hizo Ibn al-Shāṭir. ¿Cómo llegó a conocer Copérnico los trabajos de los astrónomos islámicos? Los historiadores han propuesto muchas posibilidades, pero se resuelva o no el misterio, está claro que hay conexiones profundas entre la tradición astronómica de los griegos de la Antigüedad, la de los árabes de la Edad Media y la de la Europa del Renacimiento. (Imagen del *De Revolutionibus* de Copérnico, cortesía de la American Philosophical Society. La imagen del texto árabe es cortesía de la Biblioteca del Vaticano.)

vimientos lineales del mundo sublunar y los movimientos circulares de los cielos. Ese mecanismo, denominado ahora par de Ṭūsī, ofrece una amplia gama de aplicaciones posibles, entre ellas la transformación del movimiento lineal de un pistón en el movimiento circular de una rueda. Quedó constancia de su origen astronómico en su designación metafórica, "el mecanismo del Sol y los planetas", cuando se aplicó a la máquina de vapor. Copérnico lo utilizó para explicar el movimiento de los planetas en el marco de su cosmología heliocéntrica.

¿Coincidencia?

Para entender bien los fundamentos de la astronomía moderna, importa distinguir entre la astronomía griega y la árabe. De no haber sido por las aportaciones de los astrónomos islámicos, la transición de la ciencia clásica griega a la europea del Renacimiento habría sido muy diferente. Los problemas inherentes a la obra de Ptolomeo eran demasiado profundos y se necesitaron varias generaciones de astrónomos árabes para organizarlos y resolverlos.

La dificultad principal residía en el lenguaje matemático empleado por Ptolomeo para describir los movimientos de los planetas, que socavaba los fundamentos físicos de la cosmología geocéntrica de Aristóteles. Si se hubiera tratado de simples errores de observación o incluso de método, la cuestión no habría sido tan grave. Sin embargo, al explicar la cosmología de Aristóteles mediante una descripción matemática que obviaba sus propiedades básicas, Ptolomeo creó un mundo artificioso y contrario al sentido común. El ecuante, por ejemplo, describía una esfera que no tenía las propiedades de las esferas. Este era el problema nuclear de la astronomía griega; demandaba una revisión en profundidad.

En sus primeros trabajos, Copérnico también se ocupó de las contradicciones matemáticas del alejandrino. Pero el problema del ecuante le preocupaba más que la cosmología geocéntrica. Pese a todo, esa cuestión no se resolvía con la hipótesis de un universo heliocéntrico, puesto que Copérnico admitía que el movimiento de los cuerpos celestes era circular, no elíptico. Precisaba, pues, del ecuante para describir trayectorias que, en realidad, eran elípticas. (Al incorporar la órbita de la Tierra dejó de necesitar los epiciclos.) La lectura atenta de las investigaciones de Copérnico muestra que sólo empleó dos teoremas que no se hallasen ya en las fuentes griegas; a saber: el lema de 'Urḍī y el par de Ṭūsī. Y los utilizó en el siglo XVI para resolver precisamente los mismos problemas a los que se enfrentaron los astrónomos islámicos en el siglo XIII. (En buena medida, el cambio hacia una cosmología heliocéntrica sólo reorienta el vector que conecta la Tierra y el Sol, lo que no obsta para que arruine de paso aspectos de la cosmología de Aristóteles que Copérnico intentaba preservar.)

Había otras semejanzas entre los trabajos de Copérnico y la astronomía árabe del Medievo. La reconfiguración con la que Copérnico describía el curso de la Luna, un cuerpo celeste estrictamente geocéntrico, resultó ser idéntica, vector a vector, a la configuración propuesta por Ibn al-Shāṭir al menos dos siglos antes. Y el modelo de Copérnico de la trayectoria de Mercurio empleaba el par de Ṭūsī de un modo idéntico, en cuanto a la colocación y a la función, al modelo de Mercurio de Ibn al-Shāṭir.

La pregunta resulta obligada: ¿Cómo llegó Copérnico a esos mismos conceptos? Según parece, no leía árabe y, por lo que sabemos, los trabajos mencionados no se habían traducido al latín.

Los historiadores disponen de varias pistas. Otto Neugebauer abrió un camino al hallar un manuscrito griego bizantino, traducido del árabe, que contenía algunos de los resultados obtenidos por los astrónomos islámicos. Copérnico conocía el griego y pudo haber tenido la oportunidad de leer el texto a principios del siglo XVI, cuando estudiaba en Italia (donde se conserva el manuscrito).

Más recientemente, he ponderado otra posibilidad. En mis visitas a diversas bibliotecas europeas he descubierto algunos manuscritos árabes sobre astronomía planetaria; entre ellos, una copia de la crítica de Ṭūsī a Ptolomeo. Parece que esos manuscritos pertenecieron a estudiosos contemporáneos de Copérnico que entendían muy bien el árabe escrito, tal como lo evidencian las notas en latín añadidas al margen. ¿Le hicieron partícipe de su contenido a Copérnico? Noel Swerdlow, de la Universidad de Chicago, y Neugebauer incluso han sugerido que las enseñanzas de muchos de los escritos árabes eran de dominio público en la Italia del siglo XVI.

Quedan cuestiones pendientes. ¿Por qué los astrónomos árabes, que tanto se esforzaban en hacer un planteamiento distinto de la astronomía ptolemaica, seguían aferrados a la cosmología aristotélica? ¿Por qué Copérnico, que había dado los pasos para ofrecer una versión matemática coherente de la cosmología aristotélica, lo abandonó todo y situó al Sol en el centro del universo? No tenía ni el menor vislumbre de la existencia posible de un factor que, como la gravedad de Newton, pudiera explicar por qué el universo se mantiene unido. Basándonos en lo que sabía, podríamos incluso acusar a Copérnico del mismo crimen de Ptolomeo: aceptar un recurso matemático sin tener una cosmología que lo respaldara. Por lo menos los astrónomos árabes siempre fueron coherentes.

En resumidas cuentas, si queremos discernir lo que la ciencia europea del Renacimiento debe a los árabes y lo que éstos tomaron de los griegos, habrá que afinar nuestros conceptos analíticos.

Bibliografía complementaria

ASTRONOMY AND HISTORY: SELECTED ESSAYS. O. Neugebauer. Springer Verlag; Nueva York, 1983.

STUDIES IN THE ISLAMIC EXACT SCIENCES. Dirigido por E. Kennedy, D. King y M. H. Kennedy. American University of Beirut; Beirut, 1983.

MATHEMATICAL ASTRONOMY IN COPERNICUS'S *DE REVOLUTIONIBUS*. N. Swerdlow y O. Neugebauer. Springer Verlag; Nueva York, 1984.

A HISTORY OF ARABIC ASTRONOMY: PLANETARY THEORIES DURING THE GOLDEN AGE OF ISLAM. G. Saliba. New York University Press; Nueva York, 1994.

Las primeras formas de vida, a debate

La ciencia se ha visto obligada a replantearse los criterios de identificación de la existencia de vida. Las pruebas geológicas de ayer parecen ahora menos sólidas

Sarah Simpson

1. EN ISUA, GROENLANDIA (*página siguiente*), se encuentran las rocas que encierran las pruebas más convincentes de la existencia de organismos unicelulares hace más de 3700 millones de años, sólo varios millones de años tras la constitución del planeta. Por otro lado, se ha puesto en cuestión que determinados hallazgos en yacimientos antiquísimos de Groenlandia y Australia, que comprenden microscópicas estructuras recurvadas, fueran, como se venía admitiendo, células fósiles (*arriba*).

J. WILLIAM SCHOPF *Universidad de California, Los Angeles (izquierda)*; JAMES L. AMOS *Corbis (derecha)*

Los organismos prehistóricos nos han dejado innumerables pruebas de su existencia fosilizados en rocas antiquísimas. Enormes fémures pertenecientes a pesados dinosaurios arrastrados por ríos desbordados yacen ahora entre las argilitas. Las hojas rizadas de helechos tropicales que crecieron en ciénagas, se encuentran entre capas de carbón azabache. Serpenteantes galerías, excavadas por gusanos en delgados fondos marinos, perduran en calizas grises. Estos indicios de vida se distinguen con nitidez de su sarcófago pétreo. Ahora bien, cuanto más antiguo es el organismo, mayor misterio rodea la tumba en que yace.

Antes de que la vida empezara a andar, reptar o echar raíces, habitaban en la Tierra solitarias células microscópicas. Casi todas las huellas de aquellas células que vivieron hace unos 2500 millones de años, durante el eón Arcaico, se han vuelto indistinguibles de las rocas donde se hallan impresas. Millones de años de violentas sacudidas, hundimientos, elevaciones y repetidas compresiones, no han permitido la pervivencia de muchos fósiles de células en las rocas de la superficie terrestre a las que podamos hoy acceder. A menudo, la geología debe apoyarse en otros signos de vida, las llamadas bioseñales; incluidas entre éstas las menos evidentes, como los restos de carbono cuya composición química va asociada en exclusiva a un organismo.



Hace una década, y merced a potentes microscopios, se detectaron fósiles en rocas de 3465 millones de años de antigüedad. De una época, pues, que nos remontaba a cuando unas moléculas inorgánicas simples comenzaron a replicarse y a interaccionar de forma selectiva con su entorno: los albores de la vida.

En 1996, la aplicación de nuevas técnicas de medición de sutiles variaciones en la composición química de muestras de carbono pareció consolidar las sospechas de que la vida existía, al menos, 365 millones de años antes. Ese mismo año se produjo un anuncio sensacional. Un meteorito hallado en la Antártida contenía bioseñales procedentes de Marte de 3900 millones de años de antigüedad. Ello animó todavía más a los expertos, que ganaron confianza en su capacidad para detectar pruebas de vida fósil a partir de tenues rastros en las rocas.

Pero la euforia se apagó. Las pruebas del meteorito marciano se pusieron en tela de juicio. Sólo un indicio de vida en Marte clama aún por su aceptación (*véase el recuadro* "Imanes marcianos"). A principios del año 2002 la confianza en las pruebas de vida terrestre, que gozaban de una aceptación mayor, experimentó, sin embargo, una crisis similar. Una marea de investigaciones arrojó serias dudas sobre los registros geológicos de Groenlandia y Australia, considerados hasta entonces los más antiguos de vida en la Tierra. La inquisición geológica sugiere que las rocas se formaron en ambientes donde la vida no hubiera podido prosperar. Desde otras disciplinas se plantea la posibilidad de que la química inorgánica imite las especiales huellas del carbono o incluso las formas de fósiles microscópicos; no habría tales bioseñales.

Los análisis revisionistas avivan el debate sobre los criterios fiables de una correcta identificación de vida primitiva en la Tierra, así como en otras partes del sistema solar. "Si no podemos asegurarlo en el caso de la Tierra, tampoco podemos hacerlo en el caso de Marte", afirma Bruce Runnegar, paleontólogo de la Universidad de California en Los Angeles.

Viaje de ida y vuelta al infierno

La prueba más antigua, y la más controvertida también, de la existencia de vida en el planeta azul apareció hace siete años en el sudoeste de Akilia, un islote frío y yermo de Groenlandia. Esa pequeña isla se encuentra a treinta kilómetros al sur de Nuuk, la capital. Su extensión máxima es de dos kilómetros de longitud. Allí, bajo gruesas capas de musgo y líquenes árticos, destacan, entre oscuros bloques volcánicos, vetas de rocas ricas en cuarzo lechoso. A partir de los elementos radiactivos hallados sólo en minerales volcánicos se dató un bloque próximo en 3830 millones de años de antigüedad, situándolo entre las rocas más antiguas que se conservan actualmente en la superficie de la Tierra. Basándose en su localización, algunos suponen que la deslumbrante roca blanca (que no contiene minerales datables) es todavía más antigua.

En el inhóspito paisaje de Akilia parece que las rocas hayan tenido siempre, desde sus orígenes, el mismo aspecto. Pero no hay que olvidar que la Tierra es dinámica y que estos afloramientos, como la mayoría de los del eón Arcaico, han sufrido uno de los procesos geológicos más traumáticos que ocurren en nuestro planeta, el metamorfismo. A lo largo del 85 por ciento del tiempo de existencia de la Tierra, estas rocas se han hundido, plegado, retorcido; han sido atravesadas por fluidos, empujadas hacia profundidades infernales, a 70 kilómetros de la superficie y sometidas a temperaturas de 700 grados centígrados, antes de emerger de nuevo a la superficie durante, al menos, dos episodios de ascensión. Si algunas de estas rocas son vestigios de un fondo oceánico que alguna vez albergó vida microscópica resultará punto menos que imposible encontrar una prueba cabal de la existencia de tales organismos.

Ya en 1996 Stephen J. Mojzsis, hoy en la Universidad de Colorado en Boulder, apreció un rastro de vida en esa roca blanca. Mediante la exploración a fondo por microscopía electrónica de barrido detectó negras trazas de grafito, mineral de carbono puro que, algunas veces, se forma tras la combustión de materia orgánica. También halló cristales de apatita que recubrían el grafito y que, muy probablemente, lo protegieron de las transformaciones metamórficas más drásticas.

Aunque lo que acabó por convencer a Mojzsis fue la particular desviación en la razón isotópica presente en las dos docenas de trazas analizadas de modo más exhaustivo. Todas ellas eran ricas en carbono 12, el isótopo más ligero y común de dicho elemento. Los organismos vivos son frugales por naturaleza. Emplean dióxido de carbono para alimentar sus actividades y aprovechan con mayor eficiencia el isótopo de carbono más ligero que el carbono 13, notablemente más pesado a causa del neutrón adicional de su núcleo atómico. Esta preferencia les deja una mayor propor-

Resumen/*Vida primigenia*

- Muchas de las muestras de la vida microscópica más antigua de la Tierra, las bioseñales, se hallan en las rocas. Las bioseñales detectadas se convierten en signos convincentes de vida cuando los geólogos pueden afirmar que las rocas que las albergan se formaron en ambientes favorables para el desarrollo biológico; por ejemplo, un mar somero.
- Algunas bioseñales pueden ser imitadas por reacciones químicas no biológicas que se producen a altas temperaturas y presiones. Estas reacciones se dan, a menudo, en rocas que se hallan a grandes profundidades o en rocas fundidas que se enfrían y solidifican.
- Las dudas que rodean a los orígenes de las bioseñales demuestran que las interpretaciones precisas de la geología son la clave de cualquier intento de encontrar signos evidentes de vida antigua en la Tierra, en Marte o en cualquier otro lugar.



2. LAS FRANJAS BLANCAS de este afloramiento rocoso, en el extremo sur del islote de Akilia, en Groenlandia, esconden partículas de carbono que, en un principio, se consideraron señales de una vida de una antigüedad superior a los 3800 millones de años.

CHRISTOPHER M. FEDO *Universidad George Washington*

ción de átomos de carbono 12 (entre un 2 y un 3 por ciento más) que en el dióxido de carbono disuelto en el océano.

La presencia de este isótopo ligero había ido consolidando su posición, a lo largo de casi sesenta años, como una prueba incontrovertible de señales de vida, a medida que se iban publicando mediciones parecidas de rocas más recientes. Por lo tanto, cuando las muestras de grafito de Mojzsis revelaron una concentración de un 3,7 por ciento, pareció lógico que se las considerara pruebas solventes de la vida más antigua de la Tierra. Esta conclusión comportaba, además, la exigencia de que la vida se originara en un período hostil, cuando devastadores impactos de meteoritos causaron la evaporación de los océanos y convirtieron durante milenios la atmósfera terrestre en una abrasadora mezcolanza de rocas vaporizadas. Muchos investigadores, recuerda M. Fedo, vieron en el descubrimiento de Mojzsis la clave que permitía acceder a una casi desconocida era de la historia de la Tierra.

Un año después, en 1997, Fedo acompañó a Mojzsis y a otros geólogos a la isla de Akilia. Cuando puso pie en ella, sintió como si estuviera "profanando terreno sagrado". Sin embargo, muy pronto, Fedo y Mojzsis observaron distintas imágenes de la historia y distintas explicaciones de lo que significa la marca del carbono ligero. De la composición y la relación estructural de las rocas, Mojzsis y su equipo dedujeron que las rocas con grafito se originaron en un entorno biológicamente acogedor, una cuenca oceánica en la que arena y otras partículas, incluidas las células de organismos marinos, formaron una capa sedimentaria rica en cuarzo.

Observando las rocas por sí mismo, Fedo, que había estado un año cartografiando rocas arcaicas en Zimbabwe, se mostró escéptico. Sabía que las rocas ígneas, que se solidifican de magma muy caliente, pueden parecer sedimentarias y viceversa, una vez han ganado o perdido minerales clave durante el metamorfismo. Para entender la vida, primero había que conocer la geología.

Fedo y Martin J. Whitehouse, experto en geocronología del Museo Sueco de Historia Natural de Estocolmo, volvieron a Akilia para realizar su propia cartografía y análisis químicos. Según publicaron en la primavera del año 2002, llegaron a la conclusión de que las rocas ricas en cuarzo que Mojzsis y otros consideraban antiguos sedimentos constituían en realidad la progenie de rocas ígneas que habían sufrido un particular proceso metamórfico, mediante el cual se creó grafito de fuentes de carbono no biológicas. Para Fedo, es erróneo creer que las reacciones químicas inorgánicas no pueden imitar las señales de carbono ligero sólo porque todavía no se haya podido demostrar.

Todo es geología

La enorme complejidad de la geología de Akilia es la razón por la que Mojzsis, Fedo y otros discrepan entre sí. También es la razón por la que Minik T. Rosing, del Museo Geológico de la Universidad de Copenhague, considera Akilia carente de relevancia alguna. En efecto, los geólogos no se ponen de acuerdo sobre la historia de las rocas y, sin esa premisa, nunca podrá resolverse el problema.

Pese a todo, muchos se resisten a abandonar el debate sobre Akilia. De hecho, el islote figura como prioridad en la agenda de Bruce Runnegar, el nuevo director del Instituto Astrobiológico de la NASA, un consorcio de quince equipos de investigación de los Estados Unidos dedicados a la búsqueda de pruebas del origen y evolución de la vida en la Tierra y fuera de ella.

Por otro lado, Rosing y J. William Schopf, paleontólogo de la Universidad de California en Los Angeles, insisten en que, aunque se estableciera que las rocas de Akilia son sedimentos, no quedaría todavía demostrado dónde y cuándo se originó el carbono. El carbono ligero y, por lo tanto, el grafito, tan sólo pueden, razonan, abonar la posibilidad de que haya habido vida en unas rocas intensamente metamorfoseadas. Por sí mismo, el carbono no constituye una prueba. Cuando los sedimentos son sometidos a altas presiones y temperaturas, los fluidos pueden llevar consigo carbono procedente de otras fuentes más recientes. Además, los enlaces de carbono de cualquier materia orgánica presente en los sedimentos pueden romperse y recomponerse, por mucho que los cristales de apatita los protejan. En palabras de Schopf "no es adecuado deducir a partir del valor (medido) lo que fueron los valores originales. Existe una gran diferencia entre conocerlo y sospecharlo".

La caliza de Akilia ha restado atención hacia otro indicio de vida primitiva, mucho más convincente,

que se halla a 180 kilómetros al nordeste de la isla, en la región de Groenlandia conocida como Isua. Rosing detectó allí bioseñales en rocas que, según su opinión, habían sufrido una simple migración si se la compara con el tortuoso pasado de Akilia. No fue fácil encontrar este metamorfismo leve. El cinturón de rocas arcaicas de Isua, de cuatro kilómetros de ancho, se extiende, a lo largo de 35 kilómetros, por el borde occidental del monolito gris azulado del casquete glacial de Groenlandia. El brillo especial de las rocas y sus cristales de granate rojo, hornablenda negra y diópsido verde insinúan episodios metamórficos casi tan intensos como los de Akilia.

Rosing, que inicialmente se acercó a Isua para comprender el mecanismo en cuya virtud los fluidos calientes transforman las rocas, asegura que no había acudido allí en busca de improntas de vida; sobre ese aspecto era muy escéptico. Desde su primera campaña en 1980, había recorrido varias veces Isua entera, sólo accesible por helicóptero, en estancias de uno a tres meses, caminando entre el caribú, una liebre polar blanca y las perdices, también blancas, de esta región remota. Este conocimiento exhaustivo del terreno le permitió olvidarse de las rocas ígneas o demasiado complejas para albergar alguna señal de vida. Hasta que, en 1999, describió un prometedor afloramiento de rocas sedi-

Las bioseñales

Antes de la aparición de las plantas y los animales, habitaban la Tierra microorganismos unicelulares. Los paleontólogos buscan pruebas físicas de estos organismos primitivos mediante el rastreo, en rocas antiguas, de bioseñales, huellas ocultas de su existencia. Pero la validez demostrativa de la existencia de vida que se apoya en tales hallazgos se cuestiona en buena lid cuando lo observado puede explicarse a través de procesos no biológicos. A continuación esquematizamos los debates planteados.

CARBONO LIGERO

DEFINICION: Carbono con una razón de carbono 12 a carbono 13 superior que la que se da en materiales no biológicos; una tasa superior indica la preferencia de los organismos por el consumo de carbono 12, ya que convierten el dióxido de carbono en material celular.

DESCUBRIMIENTO MAS ANTIGUO: Diminutas motas de carbono halladas en Akilia, Groenlandia, en rocas de más de 3800 millones de antigüedad. La reciente investigación contradice las afirmaciones que sostienen que esas rocas que contienen el carbono ligero se formaron en un ambiente favorable para la existencia de vida. El debate actual acepta el carbono (*puntos negros, izquierda*) de las rocas que se formaron hace más de 3700 millones de años en Isua, Groenlandia, como los vestigios más antiguos de vida en la Tierra.

ESTROMATOLITOS

DEFINICION: Formaciones estratificadas y abovedadas construidas por colonias de microorganismos.

DESCUBRIMIENTO MAS ANTIGUO: Túmulos fosilizados descubiertos en el noroeste de Australia, cuya edad se cifra en 3500 millones de años; son los representantes de vida macroscópica más antigua de la Tierra que se conocen (*izquierda*). Se discute la validez demostrativa de la mayoría del resto de estromatolitos de la misma edad; por una razón: sus estructuras elementales se parecen mucho a capas minerales que pueden ser producidas de forma no biológica.

MICROFOSILES

DEFINICION: Restos de antiguas células vivas.

DESCUBRIMIENTO MAS ANTIGUO: Estructuras ondulares microscópicas, ricas en carbono (*izquierda*), halladas en rocas de hace 3500 millones de años en el noroeste de Australia. Considerados en un principio reliquias de antiguos microorganismos, la investigación reciente sugiere que los habrían podido crear procesos químicos no biológicos. Otros microfósiles más jóvenes, así las cianobacterias del Canadá de 2000 millones de años de antigüedad, están ampliamente aceptados como tales.

AZUFRE LIGERO

DEFINICION: Azufre con una proporción superior de azufre 32 respecto al azufre 34 de la que tiene el azufre que no ha sido procesado por los organismos microscópicos que emplean este elemento como fuente de energía.

DESCUBRIMIENTO MAS ANTIGUO: Partículas de pirita de sulfuro de hierro en rocas de 3500 millones de años de antigüedad halladas en el noroeste de Australia. Algunos investigadores se cuestionan si los puntiagudos y grises cristales (*derecha*) que albergan la pirita se formaron en un ambiente capaz de sostener alguna forma de vida. Los registros de esta bioseñal dejan de ser dudosos en muestras de 2500 millones de años de antigüedad.

FOSILES MOLECULARES

DEFINICION: Moléculas orgánicas complejas, semejantes a las de células vivas actuales.

DESCUBRIMIENTO MAS ANTIGUO: Hidrocarburos hallados en Australia en rocas de unos 2700 millones de años de antigüedad. Estas moléculas, derivadas de membranas celulares fosilizadas, son la prueba más antigua e indiscutida de que las células eucariotas (las dotadas de un núcleo diferenciado) y las cianobacterias productoras de oxígeno pudieron allanar el camino al linaje que desembocó, 700 millones de años después, en la *Eoentophysalis* (*derecha*).

BIOMINERALES

DEFINICION: Granos de mineral producidos por células vivas.

DESCUBRIMIENTO MAS ANTIGUO: Formas únicas de la magnetita (*derecha*), casi idénticas a algunas bacterias actuales de la Tierra, halladas en el meteorito marciano ALH84001. Se cree que los minerales marcianos tienen una antigüedad de 3900 millones de años. Se han encontrado cristales de magnetita similares en Australia, en rocas de casi 2000 millones de años de antigüedad. Ambos hallazgos son objeto de controversia.

mentarias en el margen occidental que otros geólogos corroboraron que tenía más de 3700 millones de años de antigüedad, lo que lo hacía tan antiguo como Akilia. Y fue en este afloramiento donde Rosing encontró la bioseñal de carbono ligero.

La geología, apenas modificada, de esta parte de Isua reveló detalles importantes sobre el medio sedimentario, que había sido imposible descifrar en Akilia. El carbono ligero, ligado a capas de arcilla, habría atrapado partículas orgánicas cuando éstas se depositaban en el fondo oceánico. El carbono, que abunda también en las rocas, persiste a través de una potente columna de sedimentos antiguos, que representa un millón de años o más de lenta sedimentación. Día y noche, en el transcurso de ese intervalo temporal, descendió, hasta el fondo del océano, carbono con la misma composición que el de los microorganismos actuales.

Hasta el momento nadie ha cuestionado las conclusiones básicas de Rosing, quien ha seguido trabajando en la caracterización de los microorganismos que habrían podido producir el carbono ligero. Para Runnegar, se trata de la apuesta que todo el mundo cree mejor en la búsqueda de señales de vida en Groenlandia.

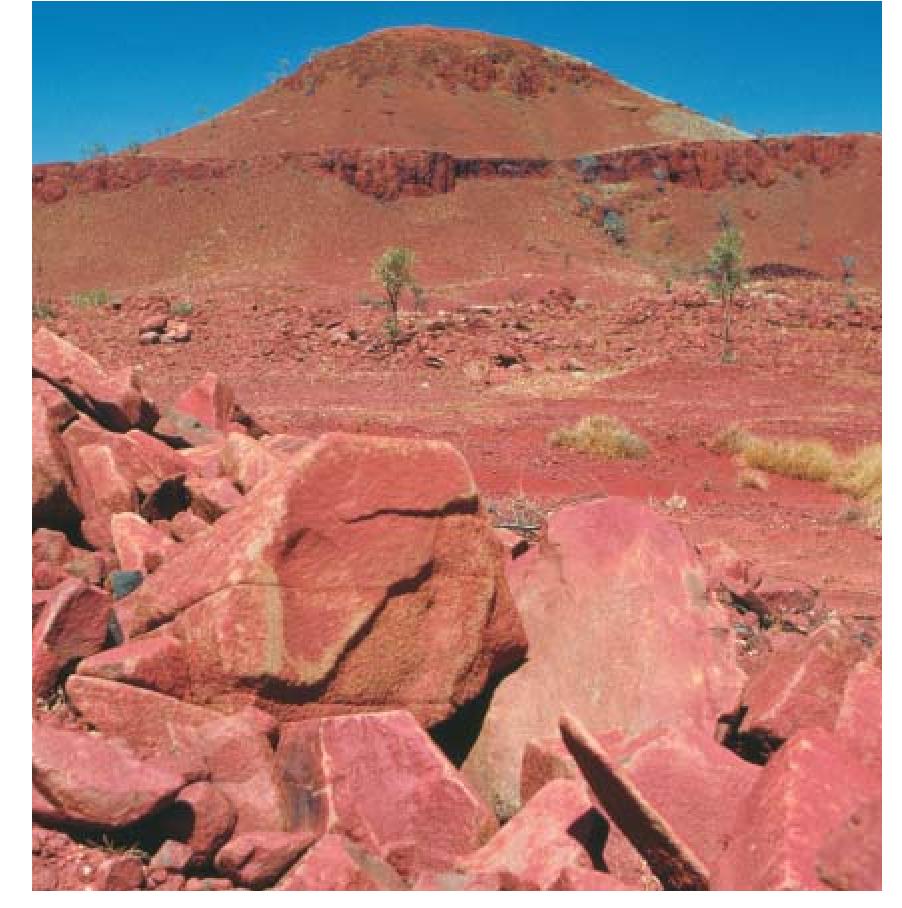
Sin embargo, incluso la mejor prueba de Groenlandia nos ofrece sólo un indicio de vida. Resultarían, sin duda, más convincentes múltiples pistas procedentes de un solo lugar. Aquí reside precisamente la fuerza de la interpretación de Schopf de las rocas australianas, interpretación admitida sin discrepancia a lo largo de casi una década.

Estromatolitos

De todas las bioseñales potenciales, la que más complace a los científicos es un fósil genuino de un organismo, aunque sea uni o bicelular. En esta categoría, el paisaje de Australia posee la mayoría de los registros hallados hasta ahora. Microfósiles fuera de toda duda, que incluyen cianobacterias productoras de oxígeno, se encuentran en rocas de 2000 millones de años de antigüedad. Hace tres años aparecieron, en rocas de 2700 millones de años, ejemplos muy convincentes de fósiles moleculares, vestigios de moléculas orgánicas complejas que antaño habían formado parte de lípidos de membranas celulares. Pero ninguno de esos excitantes descubrimientos logró remontar tan hacia atrás en el tiempo el registro fósil como lo había conseguido el trabajo pionero de Schopf, dedicado durante treinta años al estudio de antiquísimos fósiles microscópicos. Su investigación, publicada en 1993, abrió nuevos horizontes en el estudio del origen de la vida.

Al igual que en Groenlandia, los signos más antiguos de vida en el paraje de Down Under afloran en una región desolada y solitaria, una zona antigua a 1200 kilómetros al norte del puerto de Perth, en la costa occidental de Australia. Si no fuera por los ualabís brincando entre las espinas de punta silícica de los matorrales o los rótulos de algún esporádico bar de carretera, las lomas polvorientas del noroeste de Australia podrían confundirse con los relieves marcianos. Cerca de Marble Bar, un diminuto estanque en medio de este sublime mar rojo, los geólogos describieron hace ya mucho tiempo el chert de Apex, el hogar final de los famosos fósiles de Schopf, como una mezcla de arena y pequeños guijarros arrastrados por las olas a lo largo de canales marinos someros y flanqueados por volcanes. Lo mismo que las rocas con grafito de Groenlandia, el chert no admite una datación directa. Se encuentra convenientemente encajonado entre dos coladas de lava cuya antigüedad se sitúa entre 3460 millones y 3470 millones de años. De la media docena de posibles microfósiles arcaicos hallados en el mundo, incluidos los procedentes de cuatro localizaciones en Africa del Sur, los de Schopf son los más antiguos. Análisis posteriores revelarían que su reserva, si fuera realmente biológica, sería además la más diversa de todas, con 11 especies de microorganismos identificados.

Según Schopf, el chert contenía rastros de grafito tan evidentes, que él los considera partes estructurales de células. Su interpretación biológica de estas marcas proviene de la distinta proporción existente



3. EL PAISAJE MARCIANO de la región de Pilbara, al noroeste de Australia, es la cuna de estructuras microscópicas de 3500 millones de años de antigüedad que algunos identifican con hileras de antiguas células fósiles.

PAGINA IZQUIERDA: MINIK T. ROSING *Museo Geológico, Universidad de Copenhague* (*carbono ligero*), TIM LYONS *Universidad de Missouri* (*estromatolitos*), J. WILLIAM SCHOPF *U.C.L.A.* (*microfósiles*), ROGER BUICK *Universidad de Washington* (*azufre ligero*), H. J. HOFMANN *Universidad McGill* (*fósiles moleculares*), KATHIE L. THOMAS-KEPRTA *Lockheed Martin* (*minerales biológicos*); EN ESTA PAGINA: PENNY TWEEDIE *Corbis*

de carbono ligero y la presencia, muy próxima, de estromatolitos fósiles. Los estromatolitos son formaciones mineralizadas de tapices bacterianos que encierran la única señal de vida arcaica perceptible a simple vista.

A principios del año 2002, sin embargo, la interpretación de la cuna de la vida de Schopf fue puesta en entredicho por la reinterpretación de la geología local y de los fósiles mismos. En marzo, un grupo encabezado por Martin D. Brasier, micropaleontólogo de la Universidad de Oxford, publicó la primera revisión sólida de las propuestas de Schopf de 1993. Para Brasier, el chert que contenía los presuntos fósiles no se sedimentó en el soleado fondo de un mar somero, sino que lo hizo a mayor profundidad, en el oscuro subsuelo, justo en las fuentes termales del fondo marino. Esta distinción es fundamental, porque Schopf había defendido que muchos de los fósiles podían haber sido cianobacterias adaptadas a la luz. Más devastadora fue, sin embargo, la sugerencia de Brasier de que muchas de las estructuras microscópicas que recordaban a Schopf formas de vida no eran más que estructuras inertes, artefactos de la naturaleza.

Schopf admite ahora que fue un error confiar en la cartografía geológica de otros para construir su original historia. Reconoce que sus afamados fósiles quizá no fueran fotosintetizadores. Muy al contrario, podrían haber sido los precursores de las bacterias adaptadas al calor que tiñen los abrasadores acuíferos de los géiseres del Parque Nacional de Yellowstone y que pueblan los volcanes submarinos. Recientemente, Schopf reexaminó las trazas de carbono mediante la técnica de espectrometría Raman, que se basa en la dispersión de la luz para sondear las estructuras tridimensionales internas. El resultado final parece indicar que las estructuras en cuestión se asemejaban a las paredes celulares.

Brasier afirma, además, que la presencia abundante de carbono ligero pudo haber sido provocada por reacciones químicas inorgánicas, tal como postulaban Fedo y otros para los yacimientos de Akilia. Se han llevado a cabo pocas investigaciones exhaustivas en esta región, pero algunos de los experimentos sugieren que la combinación adecuada de metales y otros elementos químicos, como los que abundan en las fuentes termales del fondo oceánico, pueden cebar reacciones que imiten la preferencia de los seres vivos por el isótopo más ligero del carbono. Aunque Brasier admite la posibilidad de que parte del carbono sean restos de microorganismos, insiste en que deben descartarse los orígenes no biológicos de estos materiales antes de aceptar los biológicos.

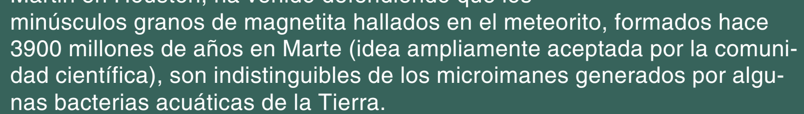
El mismo criterio debe aplicarse, tal y como Brasier y otros defenderían, a otra bioseñal, el sulfuro ligero, que se conserva en las rocas australianas de 3470 millones de años de antigüedad; se hallan éstas a dos horas en coche al noreste del polémico chert de Apex. Rocas ricas en azufre del distrito del Polo Norte (así se llama paradójicamente) contienen una proporción mayor de azufre 32 (respecto al azufre 34, más pesado); una razón que es característica de los productos de desecho generados por las bacterias que usan azufre como fuente de energía. Las trazas de azufre ligero, al igual que las del carbono, registran la vida a lo largo de la mayor parte de la historia de

Imanes marcianos

EL METEORITO ALH84001 aterrizó en la Antártida hace 13.000 años.

Extraer señales de vida convincentes de una única roca espacial no es tarea fácil. A pesar de ello, una de las últimas objeciones contra la posibilidad de que las bioseñales del meteorito ALH84001 hubieran resistido los embates de un viaje desde Marte ha recibido, a su vez, una catarata de críticas.

Durante los últimos siete años, el grupo dirigido por Katie L. Thomas-Keprta, de la compañía Lockheed Martin en Houston, ha venido defendiendo que los minúsculos granos de magnetita hallados en el meteorito, formados hace 3900 millones de años en Marte (idea ampliamente aceptada por la comunidad científica), son indistinguibles de los microimanes generados por algunas bacterias acuáticas de la Tierra.



Los investigadores más escépticos habían señalado que, al igual que supuestas bioseñales de la Tierra podrían ser resultado de procesos químicos no biológicos, en este caso se podría haber dado la transformación de los minerales ricos en hierro por inducción de calor, mediante una colisión sufrida por la roca mientras se encontraba todavía en Marte. Pero Thomas-Keprta replica que tal impacto hubiera creado magnetita con impurezas (tales como magnesio y manganeso) y que los granos que ella califica de bioseñales son cien por cien puras, un hallazgo que el grupo acaba de confirmar con una nueva tomografía tridimensional de la magnetita marciana.

A la falta de impurezas químicas hay que añadir que la magnetita del ALH84001 comparte, en un veinticinco por ciento de los casos, al menos cinco características con la magnetita producida por la estirpe bacteriana MV-1 en la Tierra. Así, por ejemplo, los granos de magnetita marciana y de las MV-1 son del mismo tamaño, carecen de defectos estructurales significativos y sus cristales presentan una insólita forma alargada que refuerza las propiedades magnéticas del mineral. Si un criterio no aparece en uno de los granos marcianos, se excluye de posibles consideraciones como bioseñal potencial. Thomas-Keprta destaca que el análisis es tan estricto, que casi una tercera parte de los cristales bacterianos no lo superaría.

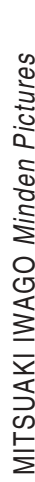
MARTE

La nueva prueba le sirve para mantener, casi con absoluta certeza, que los diminutos imanes son verdaderas señales de antigua vida en Marte. Muchos investigadores, sin embargo, continúan dudándolo. Thomas-Keprta confiesa que no se sentirá satisfecha con un solo rastro y admite que “definir una bioseñal es casi tan difícil como definir la vida misma”. Por eso, ella y su grupo se disponen a explorar el meteorito en busca de un mineral de sulfuro de hierro en particular que se sabe que lo produce una bacteria terrestre.

SETI LEAGUE, UTILIZADO CON PERMISO *www.setileague.org (arriba)*; NASA Y THE HUBBLE HERITAGE TEAM *(abajo)*



4. LOS ESTROMATOLITOS, estructuras erguidas construidas por colonias de microorganismos, medran en la Bahía Shark, en la costa occidental de Australia. También en otros lugares. Estromatolitos de hace unos 3500 millones de años se encuentran entre las supuestas señales, todavía ampliamente aceptadas, de la existencia de vida tan antigua.



la Tierra. Pero sobre esas rocas antiquísimas del occidente australiano, planea el mismo interrogante: ¿se formaron las rocas en ambientes de baja temperatura habitados por bacterias o se formaron en regiones sometidas a altas temperaturas donde las reacciones no biológicas pudieron imitar los modelos de isótopos bacterianos? El grupo de Robert Buick, de la Universidad de Washington, defiende la primera opción y sostiene que los cristales que contienen azufre se formaron en un lago en evaporación. No todo el mundo —Runnegar en particular— coincide con esta interpretación de la geología de la región.

Pese a las objeciones, Schopf mantiene su tesis básica. Expone que, aunque pueda cuestionarse una bioseñal en concreto, la falta de certeza no convierte en inútil el indicio. Una serie de bioseñales procedentes de una misma localidad, a pesar de ser discutibles consideradas una a una, agavilladas constituyen un sólido argumento. "Si se parece a la vida, tiene la ecología de la vida, presenta los isótopos de la vida y concuerda con el resto de pruebas de existencia de vida, entonces casi seguro que es vida", sentencia.

Tierra y Marte

En resumen, pues, las interpretaciones de las rocas más antiguas de Groenlandia y Australia son inevitablemente harto complejas. Su origen admite, por igual, una explicación biológica y otra no biológica. No hemos de olvidar, con todo, que el revuelo sobre Akilia y Apex atañe a la cuestión sobre si realmente son las señales de la vida más antigua de la Tierra. Además, las rocas de Isua y de la cuenca de Transvaal del Africa austral son sólo un poco más jóvenes y muchísimo menos controvertidas. Es decir, aunque se dispute en torno a los detalles, el fenómeno en sí, la gran antigüedad de la existencia de vida en el planeta, se halla fuera de discusión para la mayoría.

Una idea importante ha calado. Se investiguen rocas antiguas de la Tierra o se analicen meteoritos de otros planetas, no hemos de limitarnos a una sola prueba para sostener que demuestra la presencia de vida. Tal convencimiento debe repercutir en ulteriores búsquedas de las primeras formas de vida en la Tierra y en la interpretación de pruebas que en el futuro procedan de Marte.

Los científicos de la NASA están decididos a descifrar la geología de Marte antes de empezar a buscar huellas de vida. Las próximas misiones al planeta rojo rastrearán la superficie para determinar si en el pasado hubo un ambiente favorable para la biología. Dos robots geológicos dirigidos por control remoto empezarán su trabajo de campo en enero de 2004. Los lugares de aterrizaje se concentran allí donde las sondas orbitales han descubierto prometedores indicios de que hubo en el pasado agua líquida, necesidad básica para todas las formas de vida conocidas.

Tal y como ilustran las experiencias en Groenlandia y Australia, en la Tierra resulta difícil encontrar registros claros debido a que el movimiento constante de las placas tectónicas los ha triturado en el curso de los últimos cuatro mil millones de años. Este proceso global quizá no se haya dado nunca en Marte. Cabe, pues, esperar que su superficie haya permanecido intacta, a excepción de algunos impactos de meteoritos, a lo largo del mismo período. Si la vida existió en Marte, las pruebas de ello serán más fáciles de encontrar que en la Tierra.

Bibliografía complementaria

EVIDENCE FOR LIFE ON EARTH BEFORE 3,800 MILLION YEARS AGO. Stephen J. Mojzsis *et al*. en *Nature*, vol. 384, págs. 55-59; 7 de noviembre, 1996.

^{13}C-DEPLETED CARBON MICROPARTICLES IN >3700-MA SEA-FLOOR SEDIMENTARY ROCKS FROM WEST GREENLAND. Minik T. Rosing en *Science*, vol. 283, págs. 674-676; 29 de enero, 1999.

CRADLE OF LIFE: THE DISCOVERY OF EARTH'S EARLIEST FOSSILS. J. William Schpf. Princeton University Press, 2001.

QUESTIONING THE EVIDENCE FOR EARTH'S OLDEST FOSSILS. Martín D. Frasier *et al*. en *Nature*, vol. 416, págs. 76-81; 7 de marzo, 2002.

METASOMATIC ORIGIN OF QUARTZ-PYROXENE ROCK, AKILIA, GREENLAND, AND IMPLICATIONS FOR EARTH'S EARLIEST LIFE. Christopher M. Fedo y Martin J. Whitehouse en *Science*, vol. 296, págs. 1448-1452; 24 de mayo, 2002.

MAGNETOFOSSILS FROM ANCIENT MARS: A ROBUST BIOSIGNATURE IN THE MARTIAN METEORITE ALH84001. Katie L. Thomas-Keprta *et al*. en *Applied and Environmental Microbiology*, volumen 68, n.º 8, páginas. 3663-3672; agosto 2002.

La malla:



SLIM FILMS

computación sin límites

La técnica de malla, por medio de la vinculación a escala planetaria de procesadores digitales, sistemas de almacenamiento y programas, se apresta a transformar la informática

Ian Foster

Los primeros seres humanos no tenían más alimentos que los que lograban apresar o recoger, ni otros utensilios que los hechos por ellos mismos. Milenios de esfuerzos tendentes a superar el acoplamiento de la producción y el consumo acabaron conduciendo a la agricultura, la producción en masa y la distribución de energía eléctrica. La consiguiente especialización del trabajo, las economías de escala y las técnicas nuevas definen el mundo moderno. Gracias a ellas, puedo sentarme en un cibercafé y escribir este artículo en un portátil sin tener que pensar lo más mínimo ni en el agua, ni en el café, ni en la electricidad, ni en el ancho de banda de red inalámbrica que estoy utilizando.

La fácil disponibilidad de estos recursos es un buen ejemplo de virtualización, noción que (en informática) alude a la ocultación de funciones útiles tras una interfaz que no deja ver los detalles de su realización práctica. Cuando un empleado del café abre un grifo es como si tomara agua de un tonel sin fondo. Lo mismo sucede cuando conecto el portátil a una toma de corriente. Habida cuenta de la enorme e invisible red eléctrica que hay tras el enchufe, ¿quién sabe cómo y dónde fue generada esa energía eléctrica?

De la computación propiamente dicha, sin embargo, puede decirse de todo menos que esté virtualizada. Tanto mi portátil como un ordenador fijo —o el complejo centro de datos de una gran sociedad anónima— son en gran medida sistemas autónomos que operan merced a programas almacenados *in situ*. Hoy no parecería aceptable que cada hogar o empresa hubiera de utilizar su propia central eléctrica, recurrir a su propia biblioteca y contar con su propia imprenta y su propio aljibe. ¿Por qué, pues, buscamos la autosuficiencia de los ordenadores?

Esta situación que dista de ser óptima ha llevado a considerar vías que pudieran resultar más eficientes. Las redes digitales son cada vez más rápidas. ¿Por qué no ensamblar "ordenadores" dinámicamente a partir de elementos diseminados, de modo que los usuarios puedan solicitar recursos a un proveedor adecuado —se trate de procesamiento, almacenamiento, datos o programas— con independencia del lugar donde se encuentren? Una tal "malla" informática podría ser tan ubicua como la red eléctrica, y no menos útil.

Negocio en malla

Entre los beneficiarios de una malla informática ubicua se contarían probablemente las empresas de comercio electrónico, que podrían adaptar, según les conviniera, sus sistemas de información y cómputo a los cambios en la demanda, al tiempo que los enlazarían con socios, proveedores y clientes para ampliar la gama de servicios que reciben. Imaginemos una agencia de viajes de aventura que permitiera explorar mediante realidad virtual lugares de buceo. Cuando un hipotético cliente se dispusiese a navegar por las aguas virtuales de Mallorca, sea por caso, la agencia tendría necesidad de acceder a bases de datos y a programas para obtener la información geográfica oportuna, amén de traducir esos datos a gráficos con perspectiva, sobreimpresionar en ellos la información comercial que convenga e integrar secuencias de vídeo tomadas "en tiempo real" por cámaras emplazadas en el lugar. Una pequeña agencia de turismo jamás podría permitirse la posesión en exclusiva de tales recursos. Pero con las técnicas de malla sí sería posible ensamblar los elementos necesarios, tomándolos de una variedad de proveedores, que, al prestar cada uno servicio a muchos clientes, lograrían economías de escala favorables (*véase el recuadro* "Una inmersión virtual: posible en malla").

Los sistemas en malla también son prometedores en dominios más profesionales. El acceso

a ordenadores y bases de datos remotos podría permitirle al médico la comparación de mis radiografías con las de otro millón de pacientes y, tal vez, detectar antes alguna patología. Los bioquímicos podrían clasificar en una hora, en vez de un año, 10.000 posibles futuros fármacos; los ingenieros, someter a prueba el diseño antisísmico de un puente en minutos, en vez de en meses.

Esta idea de la malla de computación globalmente virtualizada constituye una ampliación natural de la Internet de nuestros días. Internet virtualiza las comunicaciones y permite que cualquier persona o dispositivo conecte con cualquier otra persona o dispositivo con independencia de su localización o de los medios utilizados. El resultado ha sido una explosión de innovadoras funciones: correo electrónico, la Telaraña Mundial (WWW), las aplicaciones "entre iguales", entre ellas las de compartición de archivos (el sistema KaZaA, por ejemplo), sistemas sencillos de computación distribuida, como SETI@home o Fight-Aids@home, y la Smallpox Research Grid para la investigación de la viruela. El propósito de quienes estamos desarrollando la informática en malla es virtualizar la computación y la información, de modo que cualquier persona o dispositivo pueda proporcionar servicios informáticos a cualquier otra y —lo que no es menos importante— lograr todo ello de modo que el acceso a dispares conjuntos de esos servicios se efectúe de forma segura y fiable.

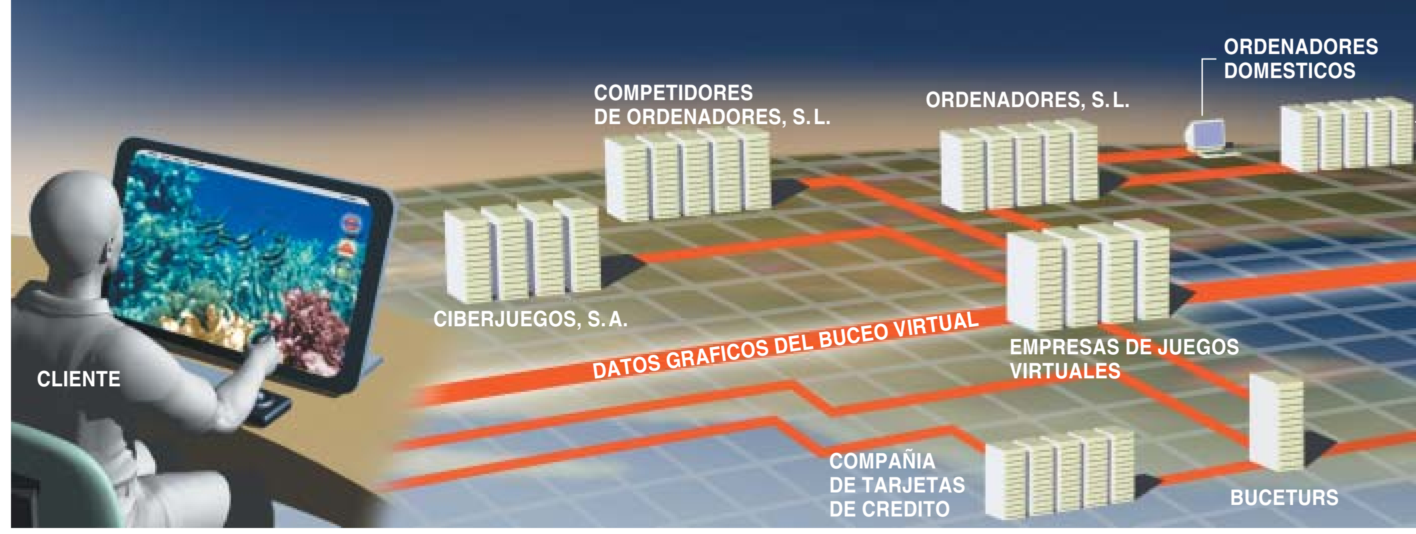
Mi interés por la computación en malla nace de la fascinante capacidad de las herramientas de cómputo de amplificar la inteligencia humana. Hace diez años estaba yo trabajando en útiles para la computación científica en el Laboratorio Nacional de Argonne, que depende del Departamento de Energía de EE.UU. Estaban naciendo por entonces las redes de gran velocidad, y se hizo evidente que si fuera posible integrar mediante redes los recursos y actividades digitales, se podría transformar el proceso de trabajo científico. Sería posible, por ejemplo, enlazar los instrumentos de laboratorio con ordenadores distantes para realizar casi al instante un análisis de los datos. Y al cotejar las distintas bases de datos ubicadas en diferentes sitios se podrían investigar correlaciones interesantes.

Por ello, decidí en 1994 reorientar mi investigación en computación distribuida. Junto con mis compañeros Steven Tuecke y Carl Kesselman establecí un proyecto para crear un conjunto de programas que permitiera la colaboración científica a escala mundial. Dimos a esta tentativa el nombre, un tanto ampuloso, de "Proyecto Globus".

La idea de la computación distribuida no es cosa nueva: muchas de las ideas implícitas en los actuales sistemas en malla son anteriores incluso a Internet. Así, por ejemplo, hará unos 40 años de que Fernando Corbato, padre de los sistemas operativos de tiempo compartido, describiese el entonces revolucionario sistema Multics como "una red eléctrica de computación". Tanto la banca como las compañías aéreas vienen utilizando complejos sistemas distribuidos desde hace decenios. Nosotros, sin embargo, hemos abordado el problema bajo un enfoque diferente, definido por las necesidades de los grupos de investigadores científicos. Nuestra experiencia nos dice que las exigencias, a menudo extremas, y el caos, sólo en parte controlado, de la investigación científica pueden

UNA INMERSION VIRTUAL: POSIBLE EN MALLA

PARA VISUALIZAR lo que podría lograr en el terreno comercial un sistema informático en malla plenamente desarrollado, imaginemos una firma de viajes de aventura (BuceTurs) que suministra exploraciones mediante la realidad virtual de sus enclaves de buceo. Este servicio consiente a un posible cliente, armado tan sólo con un ordenador personal y una palanca de juegos, "volar a través" de una representación detallada y en perspectiva de un arrecife de coral, sito, digamos, en una localidad costera de Mallorca. La empresa turística, aunque pequeña, puede permitirse proporcionar estos servicios propios de un superordenador sirviéndose de la malla para contratar la tarea de ensamblar los considerables recursos computacionales necesarios para producir una simulación realista. Cuando un posible cliente desea navegar por las aguas virtuales, los ordenadores de BuceTurs se



GEORGE RETSECK

El autor

IAN FOSTER es director asociado de la división de matemática e informática del Laboratorio Nacional de Argonne y profesor de informática en la Universidad de Chicago. Asesora a varias empresas, entre ellas, Entropia e Insors. Entre los muchos honores que se le han otorgado están el premio Global Information Infrastructure Next Generation y la Medalla Lovelace de la British Computer Society.

constituir incentivos poderosos para la innovación. No parece haber sido coincidencia que la Telaraña (WWW) fuese inventada por Tim Berners-Lee, un científico informático cuyo trabajo con físicos de altas energías le inspiró la creación de un sistema universal para compartir información.

En nuestro caso, observamos que las comunidades científicas precisan de técnicas que permitan a grupos de colaboradores integrados en distintas instituciones (a los que hemos llamado organizaciones virtuales, OV) compartir recursos de forma controlada y bien organizada. Así como los futbolistas profesionales extraídos de diferentes clubes pueden entrenarse juntos para constituir la selección nacional de un país en la Copa del Mundo, las OV atraviesan los límites ordinarios de las instituciones, creando, claro está, miríadas de problemas de organización y de política interna. En concreto, quienes participan en una OV necesitan, al implicarse en el trabajo cooperativo, compartir información, ordenadores, almacenamiento y programas, aunque, a diferencia de los futbolistas, podrían no lucir las mismas camisetas, no hablar el mismo idioma e, incluso, no estar jugando el mismo partido.

Kesselman, Tuecker y el autor imaginamos programas informáticos integradores de nuevo cuño que posibilitasen esa forma de compartir, no por sustitución de los sistemas de los sitios participantes, sino, muy al contrario, concatenándolos en una estructura de OV. Esta batería de programas lograría su objetivo mediante la estandarización de una variedad de funciones, entre ellas, y de suma importancia, la certificación de la identidad del solicitante, la autorización de las actividades solicitadas, la definición y acceso a los recursos disponibles y el control del flujo de datos. Dado que estas herramientas de las OV operarían superpuestas a las estructuras informáticas ya existentes, podrían lograr tales objetivos a un costo aceptable.

Trabajos precursores

Nuestras ideas serían puestas a prueba antes de lo pensado. A finales de 1994, Rick L. Stevens, director de la división de matemáticas y ciencias de cómputo en Argonne, y Thomas A. DeFanti, director del Laboratorio de Visualización Electrónica en la Universidad de Illinois en Chicago, propusieron el establecimiento de enlaces temporales entre 11 redes informáticas de gran velocidad dedicadas a la investigación con el fin de crear en EE.UU. una malla (la "I-WAY") durante las dos semanas del congreso Supercomputación 95. Su solicitud de aplicaciones para ese sistema suscitó más de 60 respuestas de científicos.

Stevens y DeFanti también nos persuadieron a mí y a un pequeño grupo de colaboradores de Argonne para que desarrollásemos la programación necesaria que imbricase en un solo sistema virtual a los 17



sitios participantes en I-WAY. Estos protocolos permitían a los usuarios servirse de aplicaciones instaladas en ordenadores diseminados por el país. Los usuarios podían así inscribirse una sola vez, localizar ordenadores adecuados, reservar para sí tiempo de máquina, cargar los códigos de la aplicación y supervisar después su ejecución. Un grupo dirigido por Lori Freitag, de Argonne, construyó una red que permitía a ingenieros de combustión dispersos por EE.UU. trabajar cooperativamente en el perfeccionamiento de incineradoras industriales.

El experimento I-WAY constituyó un gran éxito y sirvió de inspiración para mucho de cuanto vino después. La agencia estadounidense de proyectos avanzados para la defensa (DARPA) facilitó al Proyecto Globus dinero para más investigaciones. En 1997 desvelamos la primera versión de nuestro sistema de programas informáticos para mallas, el Globus Toolkit (Instrumental Globus), y exhibimos su funcionamiento en 809 lugares de todo el mundo. Entretanto, la NSF (Fundación Nacional de Ciencias de EE.UU.) financió la creación de la Malla Tecnológica Nacional, que habría de servir para conectar a los científicos universitarios con ordenadores de gran potencia; la NASA empezó a trabajar en su Information Power Grid (que se proponía objetivos similares), y el Departamento de Energía (DOE) abrió nuevas sendas en la aplicación de mallas a la investigación científica.

El resto del decenio finisecular fue testigo de la creciente puesta en servicio de ideas y técnicas de la tecnología de malla. Los físicos proyectistas del Gran Colisionador de Hadrones del CERN (Centro Europeo de Investigación Nuclear) reconocieron que un sistema en malla sería esencial para analizar las ingentes cantidades de datos que el nuevo acelerador iba a producir. Se establecieron consecuentemente proyectos para desarrollar las técnicas necesarias, en especial la European Data Grid (la Malla Europea de Datos), así como las iniciativas de mallas estadounidenses U.S. Grid Physics Network y Particle Physics Data Grid. Estos proyectos y otros similares acicatearon el desarrollo de infraestructuras en malla, de comunidades de usuarios y de nuevos programas de aplicaciones.

La naturaleza internacional de la ciencia hace que en toda infraestructura de recursos compartidos tenga mucha importancia que se pueda interoperar sin excepciones. Fue de ayuda que casi todas las tentativas para desarrollar sistemas en malla se fundasen en el instrumental Globus Toolkit, pero quedó claro que la computación en malla podría extenderse más allá de sus usuarios iniciales sólo si contaba con normas técnicas bien definidas y orientadas a la comunidad de usuarios. Por eso, acordamos varios en 1998 la primera reunión de lo que dos años después se llamaría Foro Global de la Malla, una organización internacional de estándares y usuarios.

Resumen/*Informática en malla*

- La "informática en malla" consiste en la integración a gran escala de sistemas de cómputo (mediante redes de gran velocidad) para proporcionar el acceso bajo petición a recursos de procesado numérico intensivo o a funciones que no están al alcance de un individuo o de un grupo de máquinas.
- Los sistemas en malla, sirviéndose de lenguajes comunes y de protocolos de interacción, buscan por todo el mundo los recursos de cómputo, la información y los servicios requeridos para atender las necesidades de los usuarios locales.
- Las redes de gran integración que componen los sistemas en malla han de ser transparentes para los usuarios: ha de parecerles que los servicios, proporcionados desde grandes distancias, están suministrados por ordenadores locales.
- La técnica de malla permite la colaboración científica y comercial a gran escala entre miembros de comunidades virtuales, así como la experimentación a distancia, la computación distribuida de alto rendimiento y el análisis de datos.

Explotación de la malla

Las técnicas de malla son infraestructuras. No llaman la atención. Cuando una infraestructura funciona bien es tan invisible como el alcantarillado. Por otra parte, la infraestructura en malla ha hecho posibles ciertos proyectos virtualizados que sí llaman la atención.

Desde que Galileo apuntó su telescopio hacia Júpiter, ha sido la suerte del astrónomo tener que pasar largas y gélidas noches en el observatorio. Mas los avances en computación están consintiendo ahora que una nueva generación de "astrónomos de butaca" logren progresos de importancia. En lugar de tener que congelarse en nocturno aislamiento, ocupan cómodos despachos durante el día e instruyen a los ordenadores para que saquen partido de las exploraciones digitales del firmamento. Uno de los principales obstáculos que encuentran estos astrónomos de hoy no es la escasez de tiempo de observación telescópica, sino la dificultad de hallar los programas, el espacio de almacenamiento y los recursos, tanto de enlace en red como de computación, que necesitan para analizar el enorme volumen de datos que esas exploraciones generan.

Un equipo compuesto por miembros de la Universidad de Chicago, del Fermilab y de la Universidad de Wisconsin-Madison ha estado buscando la forma de aplicar técnicas de malla al análisis de datos de uno de estos nuevos archivos, el Mapa Celeste Digital Sloan. Esta ambiciosa tentativa de cartografiar una cuarta parte del cielo nocturno permitirá determinar la posición y el brillo absoluto de más de 100 millones de objetos celestes. Tenemos la vista puesta en uncir a esta tarea los recursos informáticos de laboratorios diseminados por los EE.UU., para que los científicos puedan realizar en el tiempo que se tarda en preparar una taza de café cribas que antes requerían una semana entera.

El equipo ha generado ya una base de datos de cúmulos galácticos que ofrece interés para quienes trabajan en teorías descriptivas del origen del universo. La siguiente aplicación es la búsqueda de objetos cercanos a la Tierra, asunto que a todos nos

UNA SELECCION DE PROYECTOS EN MALLA INTERNACIONALES

NOMBRE	DIRECCION ELECTRONICA	INSTITUCIONES PATROCINADORAS	OBJETIVO PRINCIPAL
Biomedical informatics Research Network	www.nbirn.net	Institutos Nacionales de la Salud (EE.UU.)	Integración y análisis de datos biomédicos
Malla científica del Dpto. de Energía de EE.UU. (DOE)	doesciencegrid.org	Oficina de Ciencia. Departamento de Energía (U.S. DOE)	Vincula recursos y aplicaciones de laboratorios científicos del DOE
Earth System Grid	www.earthsystemgrid.org	Oficina de Ciencia (U.S. DOE)	Análisis de grandes conjuntos de datos de modelos climáticos
European Grid of Solar Observatories	www.mssl.ucl.ac.uk/grid/egso	Unión Europea	Integración de investigaciones de los centros europeos de datos solares
European Union DataGrid	www.eu-datagrid.org	Unión Europea	Aplicaciones en física de altas energías, en ciencias medioambientales y en bioinformática
GridLab	gridlab.org	Unión Europea	Técnicas y aplicaciones de la computación en malla
Grid Physics Network	griphyn.org	Fundación Nacional de Ciencias (EE.UU.)	Análisis de datos de experimentos físicos de gran escala
Information Power Grid	www.ipg.nasa.gov	NASA (EE.UU.)	Apoyo a la investigación en ciencias aerospaciales
MyGrid	www.mygrid.org.uk	Programa de e-Ciencia del Reino Unido	Banco de pruebas para aplicaciones bioinformáticas
National Fusion Grid	www.fusiongrid.org	Oficina de Ciencia (U.S. DOE)	Investigaciones por ordenador de la fusión magnética
National Research Grid Initiative	www.naregi.org	Ministerio de Educación del Japón	Proyecto de investigación nacional japonés
National Virtual Observatory	www.us-vo.org	Fundación Nacional de Ciencias (EE.UU.)	Integración y análisis de datos astronómicos
Network for Earthquake Engineering Simulation	www.neesgrid.org	Fundación Nacional de Ciencias (EE.UU.)	Investigación sísmica en ingeniería
Particle Physics Data Grid	ppdg.net	Oficina de Ciencia (U.S. DOE)	Análisis de datos de experimentos en física de altas energías y física nuclear
Singapore BioGrid	www.bic.nus.edu.sg/biogrid	Gobierno de Singapur	Bioinformática
TeraGrid	teragrid.org	Fundación Nacional de Ciencias (EE.UU.)	Enlaces de infraestructura de gran velocidad entre cuatro grandes sitios de recursos científicos
WorldGrid	ivdgl.org/demo/worldgrid	Dpto. de Energía (U.S. DOE), Fundación Nac. de Ciencias (EE.UU.) y Unión Europea	Infraestructura internacional para ciencia con uso intensivo de datos

concierne, dado que algún asteroide podría hacer impacto en nuestro planeta. Esta empresa se incluye en una iniciativa internacional mucho más ambiciosa, la concatenación de muchas de esas bases de datos astronómicas, que configuraría un observatorio virtual extendido por todo el planeta.

Las técnicas de malla están asimismo dejando huella en la medicina clínica, donde la formación digital de imágenes ha facilitado la comparación de mamografías y de otras exploraciones anatómicas, tanto diacrónicamente, para los pacientes individuales, como entre las poblaciones estudiadas. Pero la mayor perfección de los sistemas de exploración clínica entraña tener que contender con un diluvio de datos visuales. Los expertos calculan que, en la actualidad, una quinta parte de las primeras exploraciones mamográficas se evalúan erróneamente. Por otra parte, en alrededor de un 20 por ciento de los casos resulta imposible localizar las imágenes obtenidas en el pasado. Las bibliotecas de imágenes digitales que están creando en la actualidad proyectos como el Archivo Nacional Mamográfico de los EE.UU. y eDiamond, en el Reino Unido, abordan estos problemas. Estos sistemas en malla ponen también al alcance de los médicos instrumentos avanzados de análisis para el diagnóstico automático, y permiten a los investigadores efectuar estudios a fondo para determinar los efectos morbosos de origen medioambiental o debidos a los hábitos de los sujetos (*véase el recuadro* "Un archivo distribuido de mamografías digitalizadas").

Otra malla de obtención de imágenes de carácter sanitario, U.S. Biomedical Informatics Research Network, está integrando datos tomados de barridos somáticos para que sean factibles estudios comparativos de imágenes cerebrales procedentes de muchas bases de datos. Esta malla podría contribuir a elucidar preguntas como la siguiente: "¿En qué difieren las estructuras cerebrales de los enfermos de Alzheimer de las correspondientes a personas sanas?"

La Red Estadounidense de Simulación Sísmica (NEES) deja ver de qué modo pueden contribuir a la experimentación las técnicas de malla. Los ingenieros civiles, al proyectar estructuras capaces de resistir los terremotos, ensayan sus ideas en instalaciones experimentales con mesas vibratorias y centrifugadoras. Parte del programa, presupuestado con 82 millones de dólares, se centra en ensamblar una malla NEES que integre las instalaciones ya existentes y las de nueva construcción con los archivos de datos, los recursos informáticos y la comunidad de usuarios repartida por todo el país. La malla NEES posibilita que los investigadores de puntos ale-



jados participen en experimentos realizados en cualquier otro lugar. Este verano, por ejemplo, está previsto un estudio de pilares de puente que será ensayado simultáneamente en mesas vibratorias de California y de Illinois. Las redes comunicarán las intensidades de las fuerzas de realimentación pertinentes; proporcionarán así datos sobre el comportamiento de tales estructuras en los terremotos.

La implantación de la malla

No son los científicos los únicos vivamente interesados en las posibilidades que ofrece la computación en malla. Desde el año 2000, son cada vez más las compañías que han buscado aplicaciones comerciales para las técnicas de malla, entre ellas Avaki, DataSynapse, Entropia, Fujitsu, Hewlett-Packard, IBM, NEC, Oracle, Platform, Sun y United Devices. Cada vez más frecuentemente podemos leer frases como "servicio público de informática", "comercio electrónico a petición", "computación planetaria", "informática autónoma" y "mallas de empresa" en las publicaciones de mercadotecnia y en los planes de las empresas.

Para comprender este creciente interés hemos de tener en cuenta los elevados costos y la no menor frustración que entraña el manejo de ordenadores, una actividad que nunca ha progresado mucho más allá del "arrégleselas como pueda". Todos sabemos que los usuarios dedican demasiado tiempo a instalar, mantener, detectar fallos, recomponer y actualizar sus sistemas privados, los cuales, por otra parte, no funcionan bien en conjunción. La computación en malla ofrece la promesa de superar estos problemas al desacoplar la producción y el consumo, lo que permitiría que funciones especializadas y servicios comunes se convirtieran en bienes comerciales.

Los progresos hacia esta meta serán de todo menos directos. No obstante, se han producido ya transiciones similares en la industria, la distribución de energía eléctrica y la telefonía. El automóvil, por ejemplo, era en un principio un artefacto de lujo para aficionados expertos.

Un éxito similar en la industria informática podría desembocar en un ecosistema computacional compuesto por fabricantes, distribuidores y usuarios finales. Los productores podrían beneficiarse de economías de escala y mejorar la seguridad y la fiabilidad. Los distribuidores podrían centrarse en la intermediación entre las demandas de los usuarios y los servicios disponibles, y en buscar formas novedosas de servicios con valor añadido. Los usuarios podrían beneficiarse de una panoplia en rápido desarrollo de aplicaciones y de dispositivos cuyo motor serían los nuevos servicios remotos.

Muchas y muy innovadoras habrán de ser las técnicas necesarias para lograr que este sueño de computación en malla se torne realidad. Internet y la Telaraña nos permiten enviar mensajes y acceder a páginas prácticamente desde cualquier punto; para que los usuarios puedan compartir recursos a gran escala será necesario mucho más. En efecto, tenemos ya el don del habla, pero no un lenguaje común. Los colabora-

GEORGE RETSECK

dores han de convenir la forma en que se describen los servicios, cómo determinan las partes la identidad de sus interlocutores, de qué forma son descritas y verificadas las reglas de acceso, y de qué forma se desarrollan las actividades.

El mundo de la malla dio un paso importante en lo que a esto se refiere con el lanzamiento en 2002 de una iniciativa para definir la arquitectura abierta de los servicios en malla (Open Grid Services Architecture). La arquitectura del sistema integra técnicas de servicios de la Telaraña que han llegado a popularizarse en la industria gracias a las técnicas de malla estrenadas por la comunidad científica.

Enchufados a la malla

Al objeto de ilustrar lo que podría lograr una arquitectura abierta plenamente desarrollada, volvamos a nuestra compañía de viajes de aventura, BuceTurs. ¿Qué sucede si un posible cliente solicita una inmersión virtual en las costas de Mallorca? BuceTurs empieza averiguando si el cliente dispone de conexión de banda ancha, determina lo que el cliente desea ver y traslada la responsabilidad de atender tal petición a un proveedor de servicios de realidad virtual, CiberJuegos S.A. (CiberJuegos también presta servicios a compañías de juegos en Internet para múltiples jugadores, de aquí su nombre.) CiberJuegos, a su vez, ensambla los datos y los programas necesarios para suministrar el flujo sobre la marcha (*streaming*) de vídeo generado en respuesta a las órdenes de navegación del usuario. Sus ordenadores exploran la malla buscando localizar el mejor proveedor de ciclos de cómputo para la presentación del flujo de vídeo. A continuación CiberJuegos instala estos programas, y la inmersión virtual se pone en marcha. A todos los efectos, CiberJuegos actúa como intermediario, agregando servicios tomados de distintas fuentes para dotar al usuario de una capacidad especializada.

Aunque tales negociaciones e intercambios han de parecerle transparentes al usuario, lograr que funcionen sin tropiezos dista de ser fácil. Los ingenieros de CiberJuegos tienen que haber preparado antes programas especializados, capaces de funcionar en diversos ordenadores, y tienen que saber la forma de estimar primero, y de localizar después, la potencia de cómputo y la capacidad de enlace por red que necesitan. A tal fin se ponen en contacto con un "gestor" de confianza, que hace el papel de caja de compensación de pagos y cobros de servicios informáticos. Tras haber localizado un candidato idóneo —por ejemplo, Ordenadores S.L.— se ponen en contacto con él valiéndose de un cierto lenguaje común. Seguidamente negocian para establecer bases transaccionales aceptables ("No soy un hacker" y "Puedo abonar sus servicios" y "Ustedes son una compañía consolidada") y establecer los términos de la transacción (el número de ordenadores, su rendimiento, los costos y demás detalles.)

Una vez que los ingenieros han negociado el acceso a los equipos de Ordenadores S. L., la compañía CiberJuegos tiene que cargar sus programas y gestionar la experiencia de inmersión virtual. Es posible que el cliente tome una dirección inesperada, aumentando el consumo de recursos informáticos, o puede que fallen algunos ordenadores o redes. En cualquiera de esos casos, Ordenadores S.L. tendrá que incorporar ordenadores adicionales, o bien reducir la fidelidad de la simulación.

Observemos que estas interacciones precisan de lenguajes normalizados para la descripción, la publicidad y la solicitud de las prestaciones suministradas por los operadores de recursos y para hacer posible la conversación entre los participantes. Son también necesarios los mecanismos para establecer identidades, para contabilizar la utilización, organizar los pagos, etc. Los programas necesarios para realizar muchas de estas tareas están ya incorporados al Globus Toolkit; los grupos de trabajo del Foro Malla Global difunden estándares más generales.

Confío en que la normalización sea acicate para la innovación y la competencia en los servicios de computación, como ha ocurrido en otras industrias. Podría resultar factible recurrir a agregados de ordenadores personales, o incluso a los ordenadores de los domicilios, que podrían constituir recursos de cómputo o almacenamiento nada desdeñables. Vemos, por ejemplo, que alrededor de la mitad de los recursos de cómputo empleados en el Mapa Celeste Digital Sloan procedían de ordenadores personales agregados mediante un sistema llamado Condor. Hay compañías, como Data Synapse, Entropia, Platform, o United Devices, que están implantando interfaces para protocolos en malla en agregados de ordenadores personales al objeto de posibilitar la computación virtualizada.

El éxito de la informática en malla depende de la amplitud de su aceptación. Una estrategia bien comprobada para superar este clásico círculo vicioso consiste en facilitar el libre acceso a las técnicas básicas. Por consiguiente, no sólo es importante que todas las especificaciones fundamentales de la malla estén a libre disposición de todos, sino también que exista una forma sencilla y abierta de poner en práctica tales especificaciones. El Globus Toolkit satisface este requisito.

Bibliografía complementaria

THE GRID: BLUEPRINT FOR A NEW COMPUTING INFRASTRUCTURE. Compilación de I. Foster y C. Kesselman. Morgan Kaufman, 1999. (Segunda edición en prensa.)

THE GRID: A NEW INFRASTRUCTURE FOR 21ST CENTURY SCIENCE. I. Foster en *Physics Today*, vol. 55, n.º 2, páginas 42-47; 2001.

THE WORLD-WIDE TELESCOPE. A. Szalay y J. Gray en *Science*, vol. 293, páginas 2037-2040; 2001.

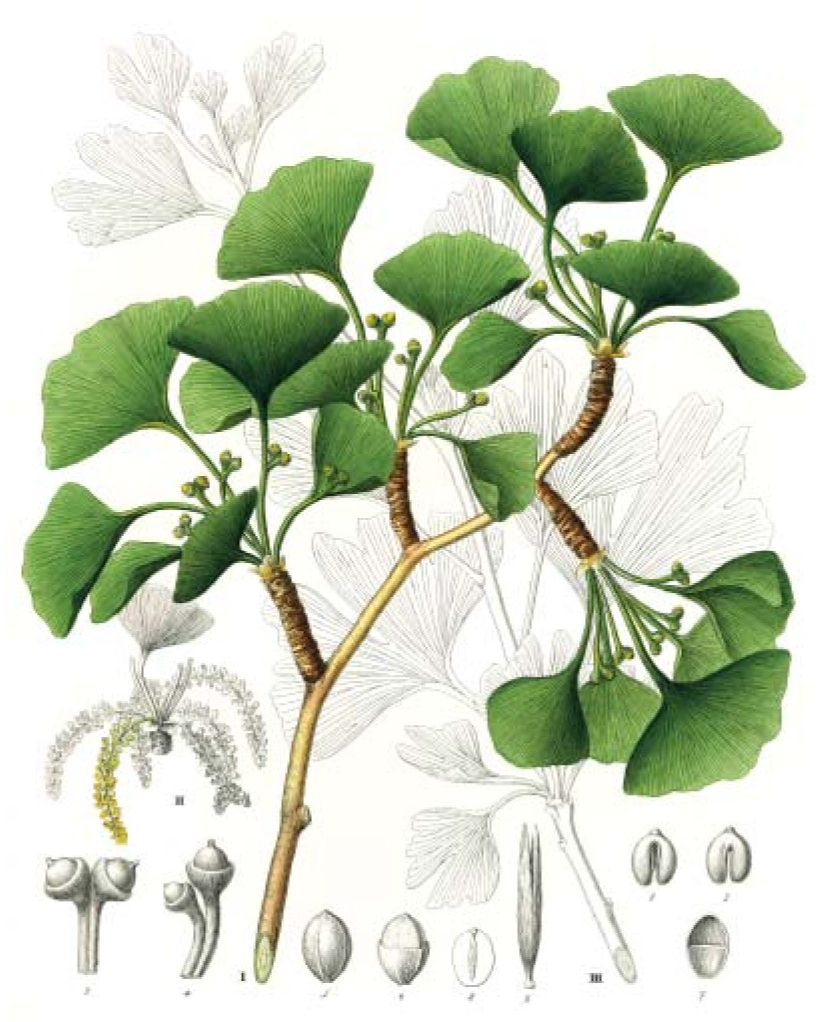
THE PHYSIOLOGY OF THE GRID: AN OPEN GRID SERVICES ARCHITECTURE FOR DISTRIBUTED SYSTEMS INTEGRATION, 2002. I. Foster, C. Kesselman, J. Nick y S. Tuecke.

GRID COMPUTING: MAKING THE GLOBAL INFRASTRUCTURE A REALITY. Compilación de F. Berman, G. Fox y T. Hey. John Wiley & Sons, 2003.

La verdad sobre *Ginkgo biloba*

No existen pruebas concluyentes de que este suplemento vegetal muy popular refuerce, siquiera ligeramente, la memoria y otras facultades

Paul E. Gold, Larry Cahill y Gary L. Wenk



LAMINA de *Flora Japonica*, un tratado escrito en el siglo XIX por Franz von Siebold, que muestra las hojas en abanico del ginkgo. El extracto de estas hojas se aplica en herboristería para mejorar la memoria.

El ginkgo es un árbol notable por muchas razones. Originario de Corea, China y Japón, adorna parques y aceras de ciudades de todo el mundo. Alcanza 40 metros de altura y vive más de 1000 años. Se conocen fósiles de ginkgo de más de 250 millones de años. Charles Darwin lo consideraba un "fósil viviente". Pero la razón principal de la fama que hoy le acompaña reside en el extracto que se obtiene de sus hojas en abanico.

Desde hace siglos la medicina china tradicional venía empleando el extracto de hojas de ginkgo. En nuestros días, el ginkgo biloba constituye quizás el tratamiento de herboristería más frecuente para reforzar las funciones cognitivas, es decir, mejorar la memoria, la capacidad de aprendizaje, la atención, el ánimo y así sucesivamente. (En algunos países su venta, sin embargo, está prohibida en herboristerías.) La administración alemana acaba de aprobar el uso del extracto para tratar las demencias. Con fondos del Instituto Nacional del Envejecimiento se está realizando, en los Estados Unidos, un ensayo clínico para evaluar la eficacia del ginkgo en el tratamiento de los síntomas de la enfermedad de Alzheimer.

Pero, ¿hay alguna prueba sólida de que ginkgo biloba pueda realmente mejorar las funciones cognitivas? En la mayoría de los suplementos dietéticos, la información se basa más en consejos de la botica de la abuela que en la experimentación científica. Los fabricantes, por

ceñirnos a la legislación sanitaria norteamericana, no tienen que comprobar la eficacia o la seguridad de sus productos porque la Agencia de Alimentación y Farmacología (FDA) no regula los remedios de herboristería.

Debería prestarse más atención a los suplementos dietéticos, como los de ginkgo biloba. Aun cuando no provoquen problemas médicos, pueden ser caros y llevar a los pacientes a evitar tratamientos más pragmáticos. En un intento de mejorar nuestro conocimiento, hemos revisado la documentación experimental, a favor y en contra, sobre la eficacia de ginkgo biloba en la mejora de las funciones cerebrales.

Muchos estudios, pocas respuestas

La dosis diaria típica de ginkgo biloba —y la que se ha aplicado en muchos de los experimentos descritos en este artículo— es 120 miligramos de extracto seco en dos o tres dosis por vía oral. El extracto contiene varios flavonoides, que son parte de una extensa familia de productos vegetales caracterizados por una estructura química específica que entraña varios anillos de carbono. El extracto de ginkgo posee también algunos biflavonoides, un grupo de compuestos emparentado con los anteriores, y dos tipos diferentes de terpenos, una clase de moléculas naturales que incluye los ingredientes activos de la yerba gatera y la marihuana.

Hasta ahora, docenas de investigaciones han examinado los efectos cognitivos del ginkgo en humanos, pero muchas de las investigaciones se han publicado en revistas con distribución muy restringida, lo que hace difícil comprobar los resultados. La gran mayoría de estos estudios implicaban sujetos con leves o moderados deterioros cerebrales, normalmente un diagnóstico de Alzheimer en fase temprana. La mayoría de los experimentos que demuestran mejora cognitiva en enfermos de Alzheimer han usado un extracto normalizado de ginkgo llamado EGb 761.

Los investigadores del ginkgo suelen utilizar pruebas de aprendizaje y memoria; se han preocupado menos de otras funciones mentales (atención, motivación o ansiedad). Más aún, como la mayoría de los investigadores aplicaron las pruebas a los sujetos después de un largo uso de ginkgo biloba (varios meses), es difícil saber qué funciones cognitivas se han visto afectadas. Por ejemplo, las mejores puntuaciones en las pruebas de memoria y aprendizaje pueden deberse a que los sujetos que tomaron ginkgo biloba prestaron mayor atención a las instrucciones sobre el desarrollo de la prueba. Para conseguir datos más específicos sobre los efectos del ginkgo, deben hacerse las pruebas antes y después de que los sujetos tomen el suplemento.

Los estudios han variado mucho en cuanto al número de sujetos y en el control de las condiciones del experimento. Conviene, pues, centrarse sólo en las investigaciones más rigurosas. En 1998, el grupo encabezado por Barry S. Oken, de la Universidad de Ciencias de la Salud de Oregón, analizaron más de cincuenta estudios en los que habían intervenido personas con problemas mentales. De ellos, eligieron cuatro que cumplían una serie de criterios conservadores; entre otros, la caracterización suficiente del diagnóstico de Alzheimer, el uso de un extracto normalizado de ginkgo y un diseño en doble ciego con control mediante placebo (ni los sujetos ni los investigadores sabían hasta el final si un paciente concreto estaba recibiendo el extracto o el placebo). Todos estos estudios mostraban que los enfermos de Alzheimer que tomaban ginkgo se desenvolvían mejor en las pruebas cognitivas que los pacientes que recibían un placebo. Las mejoras eran obvias en pruebas normalizadas que miden la atención, la memoria a corto plazo y el tiempo de reacción; el grado medio de mejora que resultaba del tratamiento con ginkgo era de 10 a 20 por ciento.

De acuerdo con Oken, el efecto del ginkgo resultaba equiparable al del fármaco donepezil, que es hoy el tratamiento recomendado para el Alzheimer. El donepezil mejora la actividad al inhibir la degradación de la acetilcolina, un neurotransmisor (es decir, un compuesto cerebral que transmite señales entre ciertas neuronas). Pese a descubrimientos tan alentadores, un



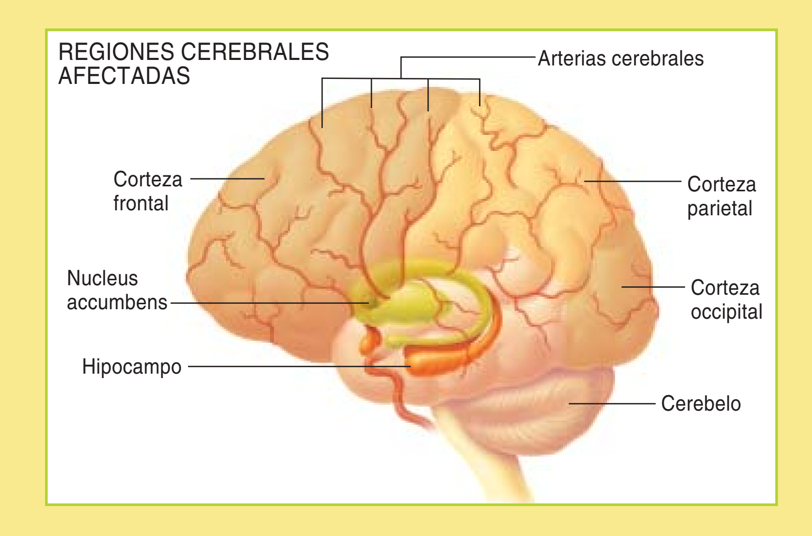
nuevo estudio más reciente, amplio y bien controlado sobre el EGb 761 (patrocinado por Productos Farmacéuticos Dr. Willmar Schwabe de Karlsruhe), realizado entre pacientes con leve o moderado estado de demencia, informó de que no había "efecto clínica o sistemáticamente significativo del ginkgo" en ninguna de las pruebas cognitivas.

Uno de los aspectos críticos es saber hasta qué punto el tratamiento con ginkgo, en los estudios que muestran efectos positivos, responde en realidad a una mejora de las capacidades cognitivas o simplemente retrasa su deterioro. Hay dos respuestas a esta cuestión, que surgen de un trabajo de 1997 dirigido por Pierre L. Le Bars, del Instituto de Investigación Médica de Nueva York. En el estudio, uno de los cuatro analizados por Oken, los resultados variaban según la prueba cognitiva empleada. Si se medía el resultado de los pacientes con la Subescala Cognitiva de la Escala de Valoración de la Enfermedad de Alzheimer, los individuos tratados con el placebo mostraban un lento

DE *FLORA JAPONICA*, POR SIEBOLD Y ZUCCARINI, LEIDEN 1835/42, EN EL HERBARIO DE LA UNIVERSIDAD DE LEIDEN (*página izquierda*); GETTY IMAGES (*arriba*)

Efectos del ginkgo ejercidos en el cerebro

NO PUEDE ASEGURARSE QUE *GINKGO BILOBA* POTENCIE LAS FUNCIONES COGNITIVAS. SI ES CIERTO QUE LA INVESTIGACION REVELA QUE EL EXTRACTO AFECTA AL CEREBRO DE VARIAS MANERAS



CIRCULATORIO

- Estimula la dilatación de los vasos sanguíneos, lo que mejora el flujo de sangre al cerebro y baja la tensión arterial (con la posible disminución de riesgo de ictus).
- Reduce el nivel de colesterol en sangre (el exceso de colesterol se halla en correlación con un riesgo mayor de sufrir la enfermedad de Alzheimer).
- Inhibe la agregación plaquetaria y la formación de coágulos. Puede disminuir por ello el riesgo de un ictus oclusivo (causado por un coágulo sanguíneo en el cerebro), pero a cambio puede aumentar el riesgo de derrame cerebral.

ANTIOXIDANTE

- Reduce la formación de radicales libres, que son moléculas con oxígeno muy reactivas que pueden dañar las neuronas y provocar cambios cerebrales asociados al envejecimiento.
- Alivia los efectos de la isquemia cerebral —pérdida del flujo sanguíneo en el cerebro— al inhibir la producción de radicales libres tóxicos tras un episodio isquémico.

UTILIZACION DE LA GLUCOSA

- Promueve la absorción de glucosa, el principal combustible del cuerpo, en la corteza frontal y parietal, que son áreas cerebrales importantes para procesar la información sensorial y para planear acciones complejas.
- Fomenta también la absorción de glucosa en el nucleus accumbens y en el cerebelo, las regiones del cerebro implicadas, respectivamente, en la sensación de placer y el control del movimiento.

SISTEMAS NEUROTRANSMISORES

- Según parece, ayuda a las neuronas del prosencéfalo a absorber de la sangre el nutriente colina. Es ésta un componente del neurotransmisor acetilcolina.
- Frena la pérdida de los receptores neuronales que dirigen la respuesta a la serotonina, un neurotransmisor que reduce la tensión nerviosa y la ansiedad.
- Agiliza la liberación del ácido gamma-amino-butírico (GABA), otro neurotransmisor, que puede aliviar la ansiedad. Al relajar la tensión nerviosa, puede reducir el nivel de hormonas glucocorticoides en sangre, lo que a su vez puede proteger el hipocampo, una estructura cerebral vital para el aprendizaje.
- Incrementa la producción de norepinefrina, otro neurotransmisor más. Se ha demostrado que la mejoría del sistema de la norepinefrina por ciertos antidepresivos reduce los síntomas de depresión.

ALICE Y. CHEN

deterioro en un año, mientras que los que recibían tratamiento con ginkgo se mantenían estables. Pero si se aplicaba una prueba diferente —Evaluación Geriátrica por Instrumento de Tasa Relativa— los sujetos tratados con ginkgo mejoraban más o menos en la misma medida en que empeoraban los tratados con placebo.

Más aún, al menos uno de los estudios informó de efectos positivo en individuos con deterioro mental después de un solo tratamiento con ginkgo. Hervé Allain, de la Universidad de Rennes, dio una dosis bastante alta —320 o 600 miligramos— de ginkgo a un pequeño grupo de ancianos con ligero deterioro mental asociado a la edad. Una hora después del tratamiento, Allain verificó la memoria de los sujetos: les mostraba listas cortas de palabras o dibujos y les solicitaba a continuación que recordaran las listas. Su capacidad para recordar el material que les habían mostrado en un breve intervalo temporal mejoró significativamente después de tomar ginkgo. Este descubrimiento abre la posibilidad de que el efecto del ginkgo sobre la cognición se deba a efectos biológicos a corto plazo, no a largo plazo.

Hay que advertir que el ginkgo también puede dañar la función cerebral. Gurcharan S. Rai y su equipo, del Hospital Whittington en Londres, hizo un pequeño estudio en ancianos con ligera o moderada merma de memoria y descubrió que, después de 24 semanas de tratamiento, los pacientes que tomaron ginkgo no podían recordar números con la fidelidad de los que tomaron un placebo.

¿Ayuda para la gente saludable?

Desgraciadamente, escasean mucho más los trabajos sobre los efectos cognitivos de ginkgo biloba en adultos jóvenes y saludables. En su pequeño estudio a mediados de los 80, Ian Hindmarch, de la Universidad de Leeds, aplicó una serie de pruebas a ocho sujetos saludables de 25 a 40 años después de que tomaran el extracto EGb 761. Observó que la dosis más alta probada (600 miligramos) mejoraba el rendimiento sólo en una prueba de memoria a corto

plazo. Más recientemente, dos informes del Laboratorio de Investigación en Fármacos Cognitivos, de Reading, ofrecieron algún apoyo a la tesis partidaria de la repercusión positiva del ginkgo en las funciones cognitivas de los jóvenes. Según uno de tales informes, los sujetos que tomaron una dosis de ginkgo funcionaron mejor que los que tomaron un placebo en pruebas que valoraban la atención. El otro estudio mostró una mejoría en la memoria de sujetos de mediana edad (entre 38 y 66 años) que fueron tratados con una mezcla de ginkgo y ginseng, otra medicina de herbolario pregonada como estimuladora de la memoria. Los efectos de este último estudio no pueden, sin embargo, atribuirse al ginkgo solo, ni mejoraron con la dosis, lo que sería de esperar de una sustancia verdaderamente efectiva.

En toda investigación sobre un nuevo fármaco, antes de pasar al ensayo con humanos, se realizan múltiples experimentos con cobayas. De estos experimentos nos valemos para determinar la eficacia y la inocuidad de un fármaco. Ahora bien, ginkgo no está reputado medicamento. Por tanto, no ha tenido que atravesar la fase de ensayo con animales. Con todo, vale la pena reseñar cierto trabajo de 1991 en ratones adultos jóvenes, que fueron entrenados para que apretaran una palanca y así recibir su comida. Los ratones tratados con ginkgo durante cuatro a ocho semanas aprendieron a hacerlo ligeramente más deprisa que los ratones de control. Sin embargo, igual que pasaba con los humanos, es difícil saber hasta qué punto el ginkgo realmente mejora el aprendizaje o si ejerce otros efectos que potencian el rendimiento del animal en una tarea específica. A este respecto, se ha observado que la administración de ginkgo reduce la tensión nerviosa en ratas; sabido es que la tensión nerviosa alterada influye mucho en el aprendizaje y la memoria.

Si el ginkgo puede mejorar de verdad el funcionamiento mental, ¿cómo actúa? Los estudios en humanos y animales de laboratorio han propuesto varios tipos de efectos biológicos que podrían explicar el supuesto robustecimiento de las funciones cognitivas atribuido al ginkgo. Sean cuales fueren sus efectos, el ginkgo parece plantear pocos riesgos para la salud, sobre todo en la dosis típica de 140 a 240 miligramos por día.

Pese a todo, se han señalado ya algunas complicaciones. Citemos los hematomas subdurales (coágulos entre las membranas cerebrales y el cerebro) y los problemas gastrointestinales. Al igual que ocurre con la mayoría de los extractos y medicinas basados en plantas, la ingestión de ginkgo se asocia a veces con náuseas y vómitos. Además, algunos usuarios experimentan un aumento de salivación, disminución del apetito, dolores de cabeza, vértigos, tinnitus (ruidos en el oído) y erupciones cutáneas. Dosis mayores pueden producir hipotensión ortostática, un problema de baja tensión arterial que, a veces, aparece después de cambios posturales bruscos, como al levantarse después de estar un tiempo sentados.



No obstante ese cuadro, la impresión general es que la incidencia de consecuencias adversas graves después de usar ginkgo es bastante baja. Y también será menor esta incidencia cuando se establezcan dosis individuales óptimas para dicho extracto.

Pero, volviendo a la pregunta inicial, ¿de verdad mejora el ginkgo biloba las funciones cognitivas? En general, los efectos aducidos son irrelevantes. El número de experimentos también es pequeño y de variable calidad; en breve: las pruebas de que el beneficio sea siquiera ligero resultan endebles. En las personas, el ginkgo puede ralentizar el declinar cognitivo de las demencias seniles. Es posible que los mayores efectos del ginkgo se disparen justo después de una dosis y que tengan vida corta, pero la bibliografía sobre la investigación es tan limitada, que no permite todavía una evaluación, ni siquiera de estos aspectos trascendentales.

El límite inferior

¿Puede afirmarse, con la documentación disponible, que el ginkgo biloba constituye una terapia óptima para mejorar la memoria? Hay otros suplementos dietéticos que se sabe que potencian la función cognitiva en animales de laboratorio y en seres humanos. El donepezil y otros fármacos estimulan el aprendizaje y la memoria en roedores y producen mejoras modestas, aunque significativas, en el hombre. Pero algunos actos relativamente sencillos pueden producir algunos de estos mismos resultados. Por ejemplo, escuchar una historia interesante, manifiestamente, libera epinefrina de las glándulas adrenales a la circulación sanguínea, mejorando la memoria sin ningún fármaco. El mecanismo por el que la epinefrina podría reforzar la memoria es mediante la liberación de glucosa almacenada en el hígado, aumen-

MONICA STEVENSON *FoodPix*

Los autores

PAUL E. GOLD, LARRY CAHILL y GARY L. WENK son autoridades reconocidas en la mejora de las funciones cerebrales. Gold enseña psicología y neurociencia en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, Cahill es profesor asociado de neurobiología y comportamiento en la de California en Irvine y Wenk da clases de psicología y neurología en la Universidad de Arizona.

Aceleradores cerebrales

Mark A. McDaniel, Steven F. Maier y Gilles O. Einstein

Los adultos de edades avanzadas muestran un comprensible interés en los “estimuladores cerebrales” de venta libre, muchos de los cuales son promocionados con grandes alardes sobre sus beneficios. Hay sólidas razones bioquímicas para esperar que algunos de estos nutrientes sean eficaces. Al revisar la bibliografía sobre la investigación en este campo, encontramos estudios que demuestran que algunas de estas sustancias han potenciado la memoria de animales de laboratorio y a veces han dado lugar a mejorías impresionantes también en seres humanos. Sin embargo, persisten muchos interrogantes sobre el tamaño de la muestra en tales trabajos, la generalización de los resultados a lo largo de diversas pruebas de memoria y diversos ámbitos de muestreo y otros aspectos metodológicos. Estos problemas, junto con una falta general de investigaciones que demuestren que los resultados pueden repetirse, atenúan el entusiasmo por la eficacia de estos nutrientes a la hora de detener o revertir sustancialmente la pérdida de memoria. He aquí un resumen de los descubrimientos sobre seis clases de compuestos que se expenden sin receta y que se supone que mejoran la memoria, lo que les facultaría para convertirse en remedio contra el declive de la memoria asociado con la edad.

FOSFATIDILSERINA (FS)

Es un lípido natural que compensa muchas de las consecuencias del envejecimiento neuronal en ratas y ratones seniles y hace que recuperen su memoria normal para diversas tareas. Sin embargo, la investigación sobre su impacto en seres humanos es escasa. En adultos con deterioro mental moderado, la FS consigue modestos aumentos en recordar listas de palabras. Estos efectos positivos no se han confirmado en otras pruebas de memoria.

COMPUESTOS DE COLINA

La fosfatidilcolina, que se suele administrar como lecitina, no ha demostrado eficacia en la mejora de la memoria de pacientes con probable enfermedad de Alzheimer. La investigación sobre la citicolina es prácticamente nula, pero un estudio informó de una gran mejoría en el recuerdo de historias en una pequeña muestra de adultos ancianos con envejecimiento normal.

PIRACETAM

Descubierto en 1967, el piracetam no ha sido aprobado por la FDA norteamericana, pero se vende en Europa y México con varios nombres (Nootropil y Pirroxil, entre otros). Los estudios en animales sugieren que el fármaco puede mejorar la transmisión neuronal y la actividad sináptica y también combatir el deterioro de las membranas neuronales asociado a la edad. Sin embargo, no hay señales claras de ninguna ventaja cognitiva en pacientes con Alzheimer o en adultos con problemas de memoria por envejecimiento.

VINPOCETINA

Es un alcaloide derivado de la pervinca que aumenta la circulación sanguínea en el cerebro. En tres estudios en ancianos con problemas de memoria asociados con mala circulación cerebral o con algún tipo de demencia, la vinpocetina produjo mejoras en la realización de pruebas cognitivas que miden la atención, la concentración y la memoria.

L-ACETIL-CARNITINA [ALC]

Es un aminoácido que se incluye en algunos suplementos de “poder cerebral” que se venden en centros de salud natural. La ALC forma parte del sistema de producción celular de energía, un proceso que reviste importancia capital para las neuronas. Los estudios en animales mostraron que la ALC revierte la pérdida de moléculas receptoras, sitas en las membranas neuronales, asociada a la edad. Pero los estudios en pacientes con Alzheimer informan de mejoras meramente nominales en una serie de pruebas de memoria.

ANTIOXIDANTES

Los antioxidantes, como las vitaminas C y E, ayudan a neutralizar los radicales libres que dañan los tejidos y que son más frecuentes con la edad. Sin embargo, diversos estudios han descubierto que la vitamina E no produce ninguna mejoría en la memoria de pacientes con Alzheimer o Parkinson. La combinación de vitaminas C y E tampoco potenció el rendimiento de estudiantes en varias tareas cognitivas.

Mark A. McDaniel es catedrático del departamento de psicología de la Universidad de Nuevo México, Steven F. Maier dirige el Centro de Neurociencias de la Universidad de Colorado en Boulder y Gilles O. Einstein enseña psicología en la Universidad de Furman.



CHUCK SAVAGE *Corbis*

AVISO A LOS COMPRADORES: Los investigadores no han encontrado pruebas convincentes de que los suplementos dietéticos puedan mejorar la memoria.



tando así la glucosa disponible para el cerebro.

Comer un simple azucarillo también puede mejorar la memoria. Hay pruebas sólidas de que la glucosa administrada sistémicamente (a los seres humanos por ingestión y a los roedores por inyección) incrementa el rendimiento cognitivo en ratas jóvenes y viejas, ratones y personas, incluidos los pacientes de Alzheimer. Al igual que la mayoría de los tratamientos que mejoran la memoria, el efecto de la glucosa sigue una curva dosis-respuesta en forma de U invertida. Sólo las dosis intermedias mejoran la memoria; las dosis bajas son ineficaces y las dosis altas pueden de hecho deteriorarla.

Debido a las diferencias en el diseño de los experimentos para verificar la eficacia del ginkgo y otros tratamientos, es difícil establecer comparaciones directas sobre su eficacia. Por ejemplo, en una prueba sobre la capacidad de recordar una historia corta, la glucosa mejoraba el rendimiento de adultos jóvenes y ancianos saludables en un 30 a 40 por ciento. En pacientes de Alzheimer, la mejoría en una prueba similar se acercó al 100 por ciento, mientras otras medidas mostraban incrementos menores. La importancia de la mejora en estos experimentos es mucho mayor que la ganancia de un 10 a 20 por ciento que se obtiene con el ginkgo. Pero la mayoría de los experimentos acometidos para comprobar la eficacia de la glucosa han usado tratamientos a corto plazo y han comparado el rendimiento antes y después, mientras que los experimentos sobre los efectos del ginkgo acostumbran seguir tratamientos a largo plazo y comparar los sujetos tratados con ginkgo con un grupo de control.

Resulta imprescindible abordar comparaciones directas de la eficacia para identificar los tratamientos que mejoran más la cognición. Este es uno de los muchos aspectos en los que nuevos estudios con roedores serían útiles porque se ofrecería a los investigadores la posibilidad de controlar todas las variables del experimento. Sólo se ha realizado un estudio que haya comparado directamente los efectos del ginkgo con los de otros tratamientos. En dicho trabajo se demostró que el máximo de mejora observada con el ginkgo era más o menos la mitad del observado con otros fármacos. Es claro que se necesitan más comparaciones directas, tanto en seres humanos como en animales de laboratorio.

Empezamos nuestro repaso de la bibliografía sobre investigación con un saludable escepticismo, pero con el compromiso de evitar prejuzgar los resultados. Encontramos pruebas que apoyan la idea de que el ginkgo mejora las funciones cognitivas, aunque débilmente y en algunas condiciones. Nuestra impresión dominante, sin embargo, es que no tenemos suficiente información como para decir de modo concluyente si el ginkgo mejora o no la cognición. No hay experimentos suficientes en los que basar recomendaciones claras y la mayoría de los estudios que muestran beneficios se han realizado con una muestra poblacional muy restringida.

Sin embargo, hay hallazgos positivos, quizá sólo los justos, para mantener nuestro interés en seguir investigando sobre el ginkgo. Muchos años de experiencia con investigaciones sobre nuevos fármacos han demostrado que los resultados positivos iniciales obtenidos en estudios con pocos sujetos tienden a desaparecer cuando los fármacos se someten a prueba en un número mayor de sujetos de poblaciones diversas. Queda aún muy lejos una prueba real que resuelva la eficacia real del ginkgo.

Bibliografía complementaria

GINKGO BILOBA: A COGNITIVE ENHANCER? Paul E. Gold, Larry Cahill y Gary L. Wenkin en *Psichological Science in the Public Interest*, vol. 3, págs. 2-11, mayo de 2002.

El periplasma procariota

El espacio periplásmico procariota es un compartimento subcelular que contiene proteínas esenciales para la catálisis de los ciclos biogeoquímicos y para la adaptabilidad bacteriana al medio ambiente

Francisco Castillo, Rafael Blasco, Manuel Martínez Luque-Romero, Francisco J. Caballero y Conrado Moreno-Vivián

Las bacterias forman uno de los grupos de organismos más ubicuos y sorprendentes de la biosfera. Su diversidad y versatilidad fisiológica y bioquímica, su plasticidad genética y su capacidad para colonizar todo tipo de entornos, tanto en sus formas de vida libre como simbiótica, saprófita o parásita, hacen de ellas un conjunto muy singular.

Se denominan procariotas porque carecen de verdadero núcleo. Han seguido dos líneas evolutivas: la que llega a las eubacterias y la que desemboca en las arqueobacterias. Se admite que, por procesos de endosimbiosis, cierto tipo de bacterias (similares a las actuales *Rickettsias*) intervendrían en el origen de las mitocondrias de las células eucariotas y que las cianobacterias hicieron lo propio en los cloroplastos de las células vegetales.

El número de bacterias presentes en la biosfera podría oscilar alrededor de 10^{30}, cifra superior en varios órdenes de magnitud al número de estrellas del universo. Estos microorganismos medran en los subsuelos marinos y terrestres (90 %), los suelos (5 %) y las aguas marinas (2 %), distribuyéndose el resto entre las aguas dulces, hielos polares y el interior de los animales o las plantas.

Hay bacterias en ambientes suaves (suelos agrícolas o aguas continentales, aparato digestivo de los animales), medianamente extremos (aguas marinas a diferentes profundidades) o totalmente extremos (volcanes, aguas a más de 100 ºC o por debajo de los 0 ºC, zonas abisales con presiones de cientos de atmósferas, aguas hipersalinas o con *p*H extremos y medios con alto contenido en compuestos tóxicos).

Se trata de los únicos organismos capaces de proliferar en un ecosistema terrestre independiente de la energía solar, los humeros submarinos. Allí constituyen el soporte productivo primario para otras especies superiores. Téngase presente, además, que las bacterias responden rápidamente a multitud de cambios ambientales, lo que les permite sobrevivir en medios cuya composición y propiedades fluctúan a veces de forma drástica e inmediata.



1. MICROGRAFIA ELECTRONICA de *Pseudomonas pseudoalcaligenes* CECT 5344 en la que se puede observar el periplasma claramente delimitado. Esta estirpe se aisló por uno de los autores (R. Blasco) a partir de lodos de una estación depuradora de aguas de Córdoba y posee características metabólicas muy interesantes, como la capacidad de degradar cianuros en medios alcalinos.

FRANCISCO CASTILLO Y COLS.

En el curso de la evolución, el metabolismo bacteriano se ha construido sobre la base de una precariedad de medios y de una alta eficacia de los instrumentos moleculares que almacenan la información genética, regulan su transmisión y ejecutan el programa almacenado tanto en el cromosoma mayor (especie de "disco duro" bacteriano) como en cromosomas menores, que, a manera de "disquetes", facilitan la transferencia horizontal de información genética.

Se conoce la secuencia del genoma completo de *Helicobacter pilori*, *Haemophilus influenzae, Escherichia coli* y varias más. Una bacteria típica se compone de unos 3000 genes, que cifran otras tantas proteínas. Esta exigua dotación le permite crecer de forma a veces explosiva, con tiempos de generación de hasta 20 minutos. Recurre para ello a fuentes de energía muy dispares, desde la luz solar hasta los gradientes naturales de *p*H, pasando por energía geotérmica, combustibles inorgánicos (agua, compuestos de nitrógeno, azufre o carbono, así como iones de hierro y manganeso) o combustibles orgánicos (hidrocarburos, ácidos carboxílicos, azúcares o lípidos).

Para vivir aprovechan toda clase de nutrientes carbonados, nitrogenados y azufrados, a veces de naturaleza xenobiótica o industrial y muy tóxicos. Algunos son los únicos organismos capaces de catalizar la reacción de Haber-Bosch (reducción de nitrógeno hasta amoníaco) a temperatura ambiente y presión atmosférica. Otros fijan la energía de la luz solar en forma de ATP, sin necesidad de los procesos habituales de oxidación-reducción; para ello se valen de una bomba de protones insertada en una estructura muy estable de proteína y fosfolípidos.

La historia de la vida en la Tierra se remonta unos 3500 millones de años. Por entonces, ciertos protoorganismos similares a las bacterias actuales inventaron todas las formas posibles de intercambiar materia y energía con el medio, elaborando al propio tiempo copias de sí mismos. Así aparecieron los procesos fermentativos, de escaso rendimiento energético, la fotosíntesis y la respiración anaeróbicas y, por último, la fotosíntesis oxigénica.

Con el postrer proceso fotosintético se fue acumulando oxígeno molecular en la atmósfera, lo que posibilitó la respiración aeróbica y, andando el tiempo, la formación de una protectora capa de ozono estratosférico. El metabolismo aeróbico es tan eficaz desde el punto de vista energético, que permitió la generación de las líneas maestras del diseño de toda clase de organismos unicelulares y pluricelulares.

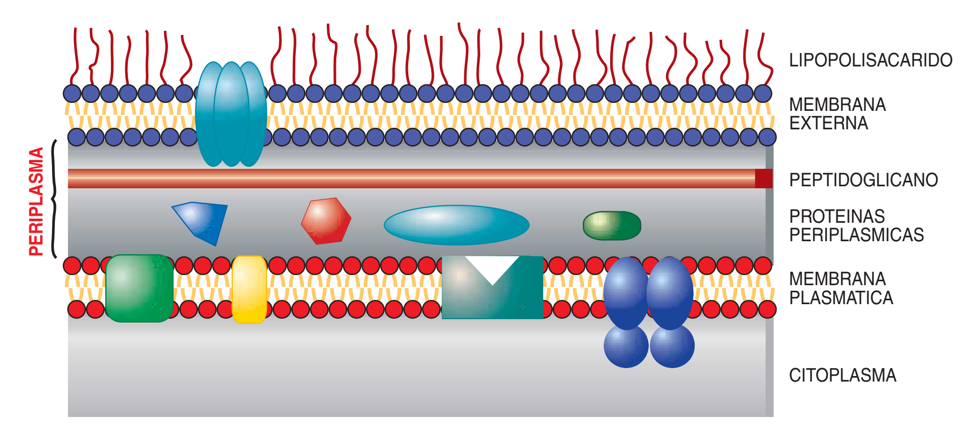
Para optimizar el uso de estos ingentes recursos metabólicos se requieren mecanismos reguladores. En este sentido, las bacterias están capacitadas para detectar los cambios, pequeños o grandes, producidos en su medio. Además, disponen de mecanismos de transmisión de señales para adaptar con presteza la maquinaria metabólica o las estructuras subcelulares a tales alteraciones del entorno.

Cuando se examina una bacteria al microscopio electrónico, distinguimos un esferoide o una figura alargada protegida por varias envolturas. Entre estas cubiertas aparece el espacio periplásmico, que es especialmente visible en las bacterias Gram negativas, y que ocupa alrededor del 10 % del volumen de la bacteria. (Por el método de Gram, así llamado en honor de Hans Christian Joachim Gram, su inventor, las bacterias teñidas con ciertos colorantes básicos pueden o no decolorarse con disolventes orgánicos. Si se decoloran, hablamos de bacterias Gram negativas; si resisten a la decoloración, las llamamos bacterias Gram positivas.)

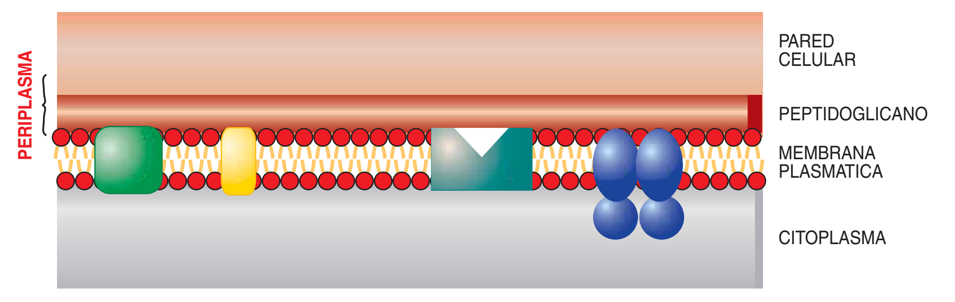
El espacio en cuestión se halla ocupado por el periplasma, una substancia cuya consistencia se aproxima bastante a la de un gel. El periplasma está compuesto por una solución acuosa de oligosacáridos, proteínas y iones. Su espesor medio se ha estimado entre 11 y 25 nanómetros. Confinado entre la membrana plasmática y la membrana externa, se rodea de una envuelta de peptidoglicano y presenta una composición osmótica similar a la del citoplasma.

El periplasma contiene una gran cantidad de proteínas, cuya movi-

ESPACIO PERIPLASMICO DE BACTERIAS GRAM NEGATIVAS



ESPACIO PERIPLASMICO DE BACTERIAS GRAM POSITIVAS

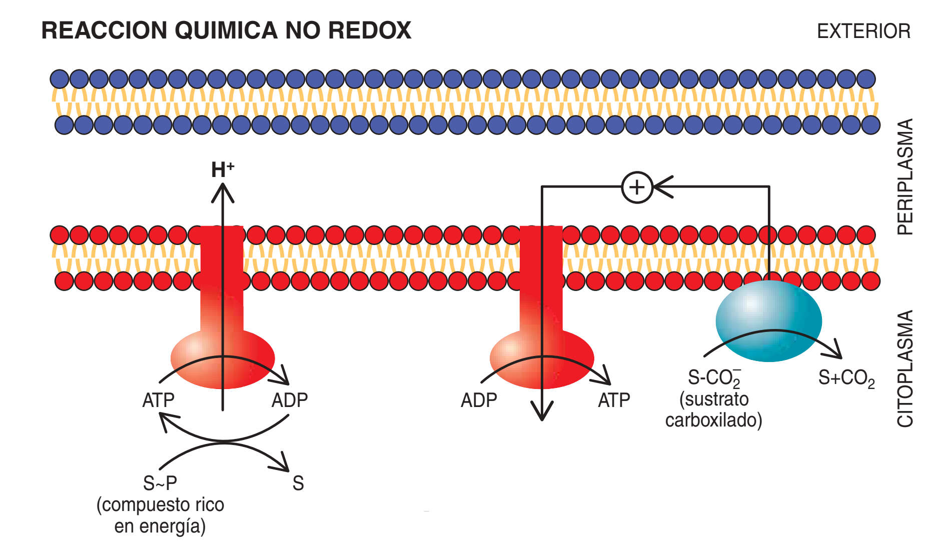


FRANCISCO CASTILLO Y COLS.

2. EL ESPACIO PERIPLASMICO DE LAS BACTERIAS es un compartimento que contiene las proteínas esenciales para la catálisis de los ciclos biogeoquímicos. Perfectamente delimitado en las bacterias Gram negativas (*arriba*), es más difuso y reducido en las bacterias Gram positivas (*abajo*).

Los autores

FRANCISCO CASTILLO, RAFAEL BLASCO, MANUEL MARTINEZ, FRANCISCO J. CABALLERO y CONRADO MORENO llevan dos decenios estudiando las bases moleculares de la fotosíntesis del nitrógeno en las bacterias y, más recientemente, la biodegradación de compuestos xenobióticos nitrogenados y halogenados. Castillo, catedrático de bioquímica y biología molecular de la Universidad de Córdoba, dirige el grupo de metabolismo bacteriano del departamento de bioquímica y biología molecular de dicha Universidad, donde también son profesores Blasco, Caballero y Moreno. Martínez es catedrático de ciencias naturales de instituto.



RESPIRACION

EXTERIOR

PERIPLASMA

CITOPLASMA

H+

ADP

ATP

A_{Ox}

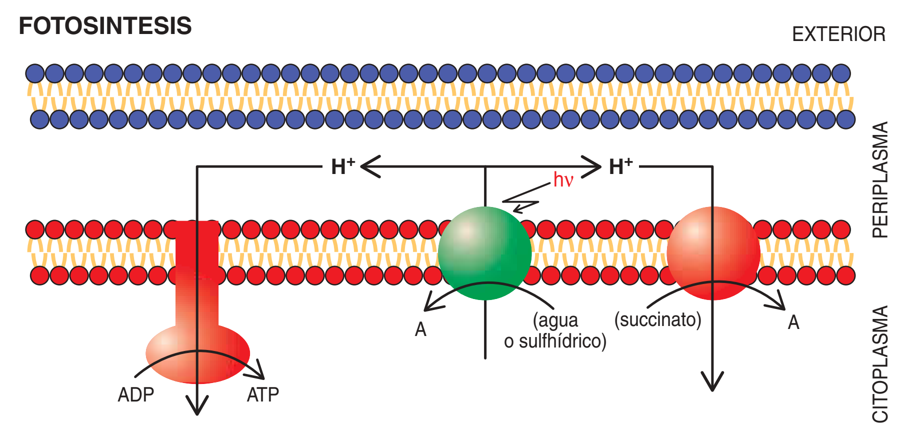
A_{Red}

D_{Red}

D_{Ox}

Par oxidante

Par reductor



3. FLUJO DE ELECTRONES y de protones entre el citoplasma y el periplasma. La generación de fuerza motriz de protones puede estar acoplada a tres tipos de procesos: una reacción química no redox, la respiración y la fotosíntesis. En la fotosíntesis, cuando el donador es una molécula de agua o de sulfhídrico (*esfera verde*), la luz genera un reductor suficientemente fuerte como para reducir al aceptor (A); pero si es un succinato, no se genera un reductor suficientemente fuerte y se requiere un transporte de electrones impulsado por la fuerza motriz de protones.

FRANCISCO CASTILLO Y COLS.

lidad está restringida por su consistencia de gel. En este sentido, se han determinado coeficientes de difusión lateral varios órdenes de magnitud inferiores a los que existen en solución acuosa o en el citoplasma bacteriano (alrededor de 10^{-10} cm^2 por segundo).

En el periplasma se dan cita proteínas transportadoras de electrones, proteínas que unen sustratos diversos y enzimas degradativas, biosintéticas o desintoxicantes. Por otra parte, numerosas proteínas integradas en la membrana plasmática exponen al periplasma uno o varios dominios estructurales, a veces relacionados con su función metabólica (transportadores de electrones o protones) o reguladora (proteínas sensoras de iones, metabolitos, O_2 y otros).

En el espacio periplásmico radica un número insospechado de procesos metabólicos y reguladores, algunos de extraordinaria importancia para el equilibrio de los gases en la biosfera o para las interconversiones de los diferentes componentes carbonados, nitrogenados, azufrados o metálicos de los grandes ciclos biogeoquímicos. Estas rutas bioquímicas están catalizadas por proteínas que se sintetizan en el citoplasma y se insertan en la membrana plasmática o exportan al periplasma a través de la membrana plasmática.

La biosíntesis de las proteínas periplásmicas plantea diferentes problemas por lo que se refiere a la maquinaria de exportación de las mismas (requerimiento de secuencias líder, translocasas, etc.) o a la inserción de los grupos prostéticos, especialmente los grupos hemo y, en general, los centros catalíticos metálicos.

Las reacciones químicas exergónicas, liberadoras de energía, pueden acoplarse a la generación de gradientes de iones entre el interior y el exterior de las membranas, particularmente en el caso de las reacciones redox. De forma excepcional, el periplasma resulta clave en algunos procesos fermentativos atípicos, como los realizados por *Propionigenium modestum* (fermentación succínica con generación de gradiente de sodio) u *Oxalobacter formigenes* (fermentación de oxalato con formación de fuerza motriz de protones). En la mayoría de las bac-

terias fermentativas, los gradientes de iones se producen mediante la energía previamente almacenada en el ATP.

Durante la respiración, la transferencia de electrones entre moléculas reductoras y oxidantes transcurre con un descenso considerable de energía libre, que se traduce en la generación de estados de alta energía (gradientes de protones o iones), plasmados luego en la síntesis de compuestos ricos en energía (ATP) y en el transporte de solutos, o transformados en energía mecánica (rotación de los flagelos que impulsan el movimiento de las bacterias en un medio acuoso).

Los protones pasan al periplasma inducidos por bucles redox (transportadores de hidrógeno que alternan con aceptores de electrones), ciclos de quinona (donde se alternan los estados semirreducido y totalmente reducido de las quinonas) o bombas de protones (proteínas transmembranales que impulsan los protones hacia el periplasma mediante cambios de conformación).

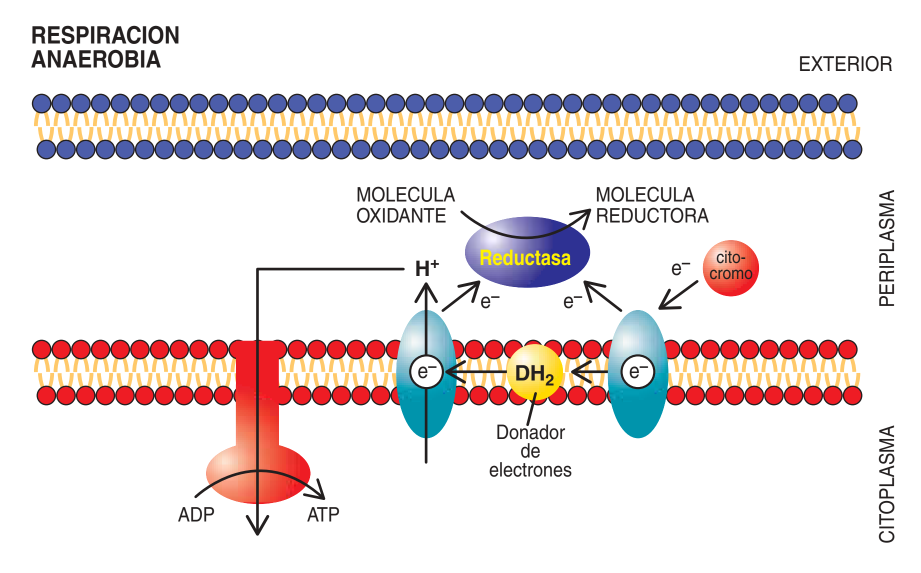
Posteriormente, el gradiente de protones se deshace mediante la reentrada de los mismos en el citoplasma a través de la sintetasa de ATP, de procesos de simporte (entrada conjunta de una molécula de soluto y un protón) o del rotor flagelar.

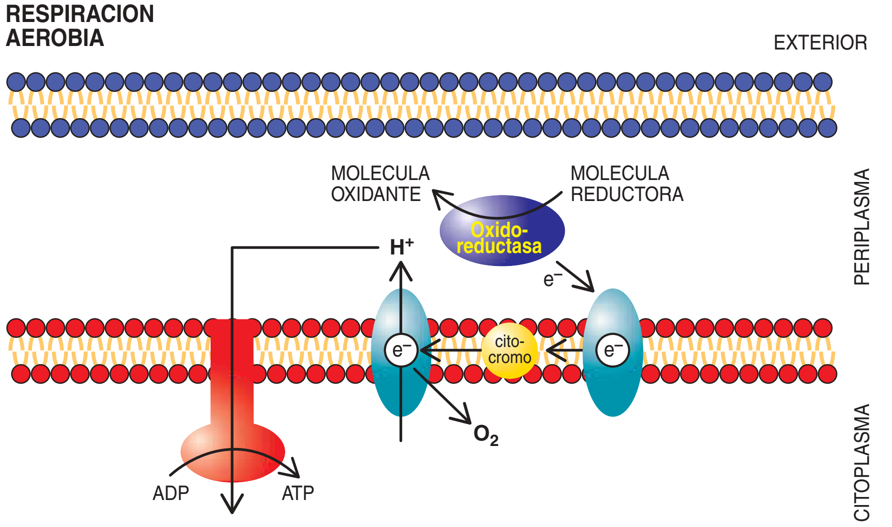
La fuerza motriz de los protones puede proceder también de la energía solar. Las bacterias absorben fotones del espectro azul, rojo o infrarrojo cercano, en cuyo proceso intervienen el acoplamiento entre el circuito electrónico impulsado por la luz (constituido por proteínas de membrana orientadas hacia el citosol o el periplasma y por quinonas) y el circuito protónico (formado por estas mismas proteínas, las quinonas y la sintasa del ATP, los transportadores de solutos o el motor flagelar).

En las halobacterias, que medran en medios salinos, la luz solar visible impulsa un circuito protónico sin intervención de procesos redox. El circuito está formado por una bomba de protones (la bacteriorrodopsina) y la sintasa del ATP, constituyendo un tipo de fotosíntesis extremadamente simple y elegante. No obstante, estas bacterias también poseen circuitos electrónicos de tipo respiratorio que operan en la oscuridad.

En todos estos procesos, el periplasma es un compartimento subcelular esencial para la conversión de la energía solar o electrónica en energía química y mecánica.

Además de constituir uno de los dos medios subcelulares entre los que se establecen los gradientes iónicos, en el periplasma se realizan numerosas transferencias electrónicas de importancia decisiva para los grandes ciclos biogeoquímicos. Las óxido-reductasas periplásmicas catalizan la transferencia de electrones hacia o desde el citoplasma, acoplándose a transportadores electrónicos de membrana que llevan a cabo simultáneamente la translocación de protones y el transporte de electrones.





4. PAPEL DEL PERIPLASMA en los ciclos biogeoquímicos. Las enzimas óxido-reductasas periplásmicas catalizan las transferencias de electrones necesarias para las transformaciones de las diferentes formas del C, N, S, Fe y otros elementos químicos presentes en la biosfera. En la respiración anaerobia, la fuerza motriz de protones se genera por transferencias de electrones a sustratos periplásmicos (nitritos, óxido nítrico, dimetil sulfóxido, y otros) que actúan como aceptores finales de electrones. En la respiración aerobia, la fuerza motriz de protones se genera por transferencias electrónicas desde sustratos periplásmicos (iones de hierro, nitritos y otros) a la molécula de oxígeno.

5. PAPEL DEL PERIPLASMA en el metabolismo de fragmentos monocarbonados. Los compuestos monocarbonados reducidos (HCOOH, metilaminas, metano) se oxidan en el periplasma (bacterias metilotrofas). La reducción de fragmentos monocarbonados a metano se produce en el citoplasma (bacterias metanógenas). Ambos tipos de rutas metabólicas generan gradiente electroquímico de protones. Al parecer, la reducción de CO_2 a acetato en los acetógenos genera una fuerza motriz de sodio.

En el ciclo del carbono, los compuestos monocarbonados como el formiato, el metanol o las metilaminas ceden sus electrones a oxidorreductasas periplásmicas que, a su vez, los transfieren a cadenas respiratorias localizadas en la membrana y acaban en el lado citoplásmico de la misma.

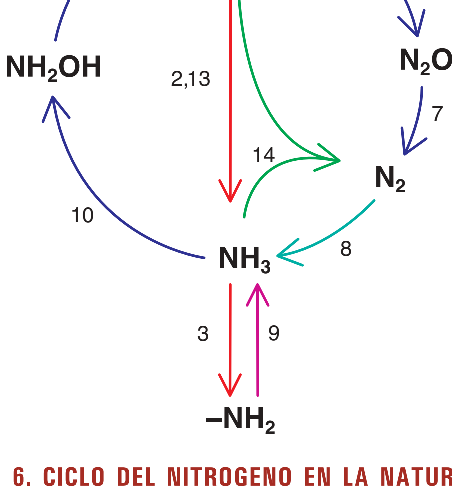
La producción bacteriana de metano, gas cuya incidencia en el efecto invernadero sólo supera el dióxido de carbono, se lleva a cabo también en el periplasma. En los procesos energéticos ligados a la metanogénesis, la generación de fuerza motriz de protones está acoplada a la reacción catalizada por un complejo enzimático que reduce el grupo metilo a metano. Por su parte, las reacciones endergónicas, o absorbentes de energía, de la metanogénesis son impulsadas por un gradiente de sodio.

En el ciclo del nitrógeno, el proceso de desnitrificación moviliza anualmente cientos de toneladas de este elemento. En dicho proceso intervienen varias proteínas periplásmicas, las reductasas del nitrito y del óxido de dinitrógeno y citocromos de tipo *c*, para regenerar el N_2 atmosférico a partir del nitrógeno nítrico con producción de óxido de dinitrógeno, un gas intermediario con efecto invernadero.

En nuestro laboratorio de la Universidad de Córdoba hemos identificado y caracterizado bioquímica y genéticamente el sistema que reduce el nitrato a nitrito en la bacteria fototrófica *Rhodobacter sphaeroides*. Cumple a ese sistema facilitar las transferencias de electrones, oxidando los cofactores redox reducidos en exceso, para optimizar el crecimiento bacteriano.

La nitrificación recicla anualmente miles de millones de toneladas de nitrógeno amoniacal. Está también catalizada por proteínas periplásmicas, en este caso la oxidorreductasa de la hidroxilamina y diversos citocromos *c*. Aunque la fijación del N_2 depende de la nitrogenasa, que no es periplásmica sino citoplasmática, la enzima requiere un reductor muy fuerte. El periplasma participa como compartimento para crear la fuerza motriz de protones, a expensas de la energía solar o de energía química.

En otros ciclos, así los del azufre y del hierro, la transferencia de electrones entre el periplasma, la membrana plasmática y el citoplasma es clave para el aprovechamien-



Enzimas
1: Nitrato reductasa asimiladora
2: Nitrito reductasa asimiladora
3: Glutamina sintetasa/Glutamato sintasa
4: Nitrato reductasa desasimiladora
5: Nitrito reductasa respiradora
6: NO reductasa
7: N_2O reductasa
8: Nitrogenasa
9: Desaminasas/aminoácido oxidasas
10: Amonio monooxigenasa
11: NH_2OH: cit*c* reductasa
12: Nitrito oxidasa
13: Nitrito reductasa desasimiladora amonificante
14: Enzima no identificada

Procesos
Asimilación: 1,2,3
Desnitrificación (respiración): 4,5,6,7
Fijación: 8
Amonificación: 9, 13
Nitrificación: 10,11,12
Oxidación anaeróbica de amonio: 14

6. CICLO DEL NITROGENO EN LA NATURALEZA. Las bacterias catalizan todas las fases del ciclo del nitrógeno, si bien las algas verdes, las plantas superiores y los hongos pueden llevar a cabo la asimilación de nitratos a compuestos nitrogenados. La asimilación del nitrato moviliza anualmente 10^{10} toneladas de nitrógeno, mientras que la reducción de N_2, sobre todo la simbiótica, fija 2×10^8 tn de nitrógeno al año.

FRANCISCO CASTILLO Y COLS.

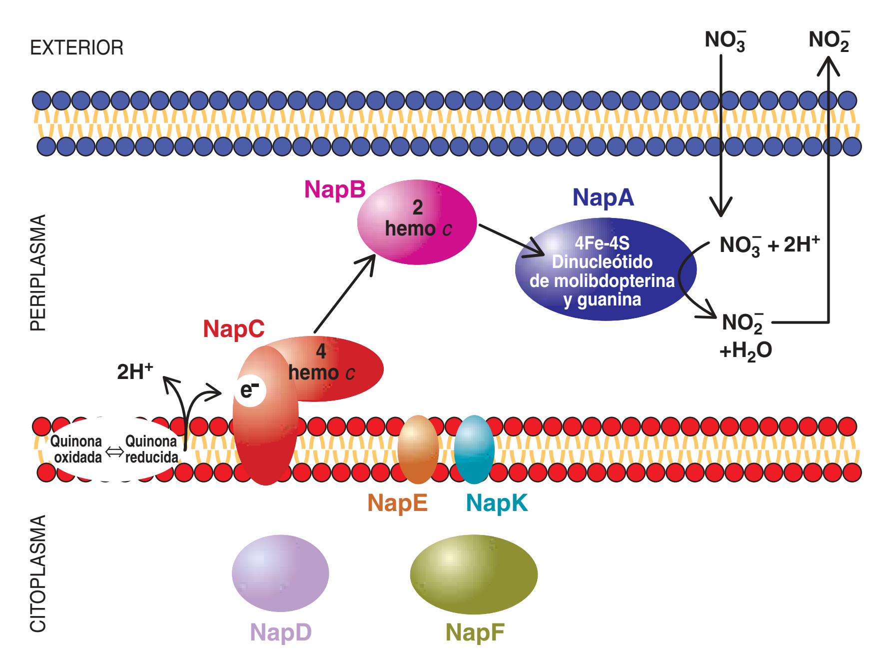
to óptimo de la energía. La interconversión bacteriana de las formas oxidadas y reducidas del azufre y del hierro es muy frecuente en las minas de piritas. Se cree que un proceso oxidante de piritas acoplado a una hidrogenasa de membrana podría ser uno de los mecanismos primitivos de bioconversión de la energía.

¿Qué papel desempeña el periplasma bacteriano en el transporte de metabolitos? Los nutrientes orgánicos (azúcares, aminoácidos), iones (nitrato, molibdato) o simples mensajeros químicos del medio (quimiorrepelentes o quimioatrayentes) se unen en el periplasma a proteínas que facilitan su transporte o la transmisión de la señal al citoplasma.

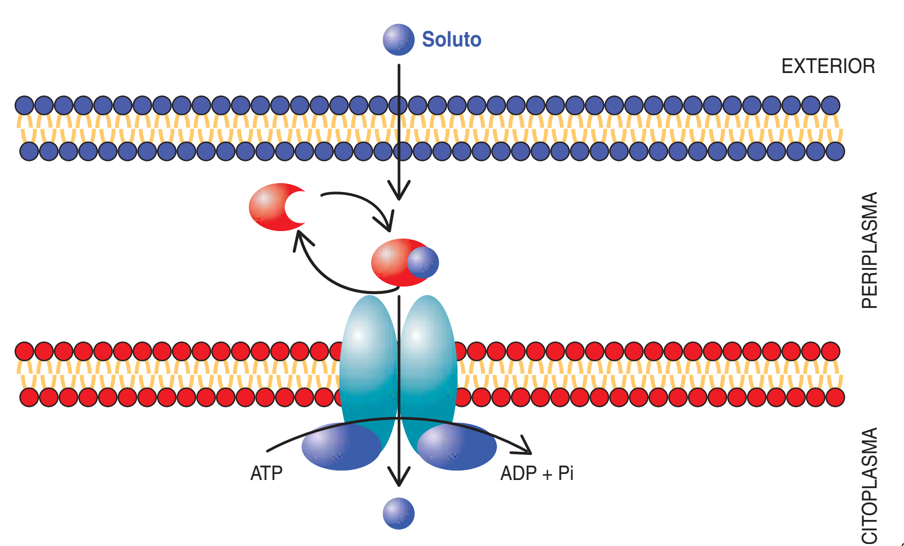
En las bacterias es muy frecuente el transporte de nutrientes impulsado por la hidrólisis del ATP. En ese proceso operan tres o cuatro componentes proteínicos, uno de los cuales es periplásmico. Tal sistema de importación de nutrientes se ha diversificado en el curso de la evolución. Algunas versiones modificadas del mismo se utilizan para el trasiego de iones en las células eucarióticas, como el transportador de cloruro denominado CFTR cuya alteración causa la fibrosis quística.

Además de cooperar activamente con los procesos metabólicos sitos en el citoplasma, el periplasma desempeña una función esencial en la captación de señales del ambiente y en el inicio de la transmisión de las señales a través de la membrana plasmática hacia el ADN, proteínas estructurales y otros blancos alojados en el citoplasma.

Este sistema de transmisión de señales extracelulares es típicamente bacteriano, aunque algunas de sus variantes se han encontrado en levaduras o plantas superiores. Constituye lo que se denomina el paradigma de los dos componentes y consiste en una proteína sensora con actividad autoquinasa de histidina, que cataliza la transferencia del grupo fosforilo a un residuo de aspartato del segundo componente, el regulador de la respuesta. Si se trata de estímulos que penetran en el interior celular, el sensor puede

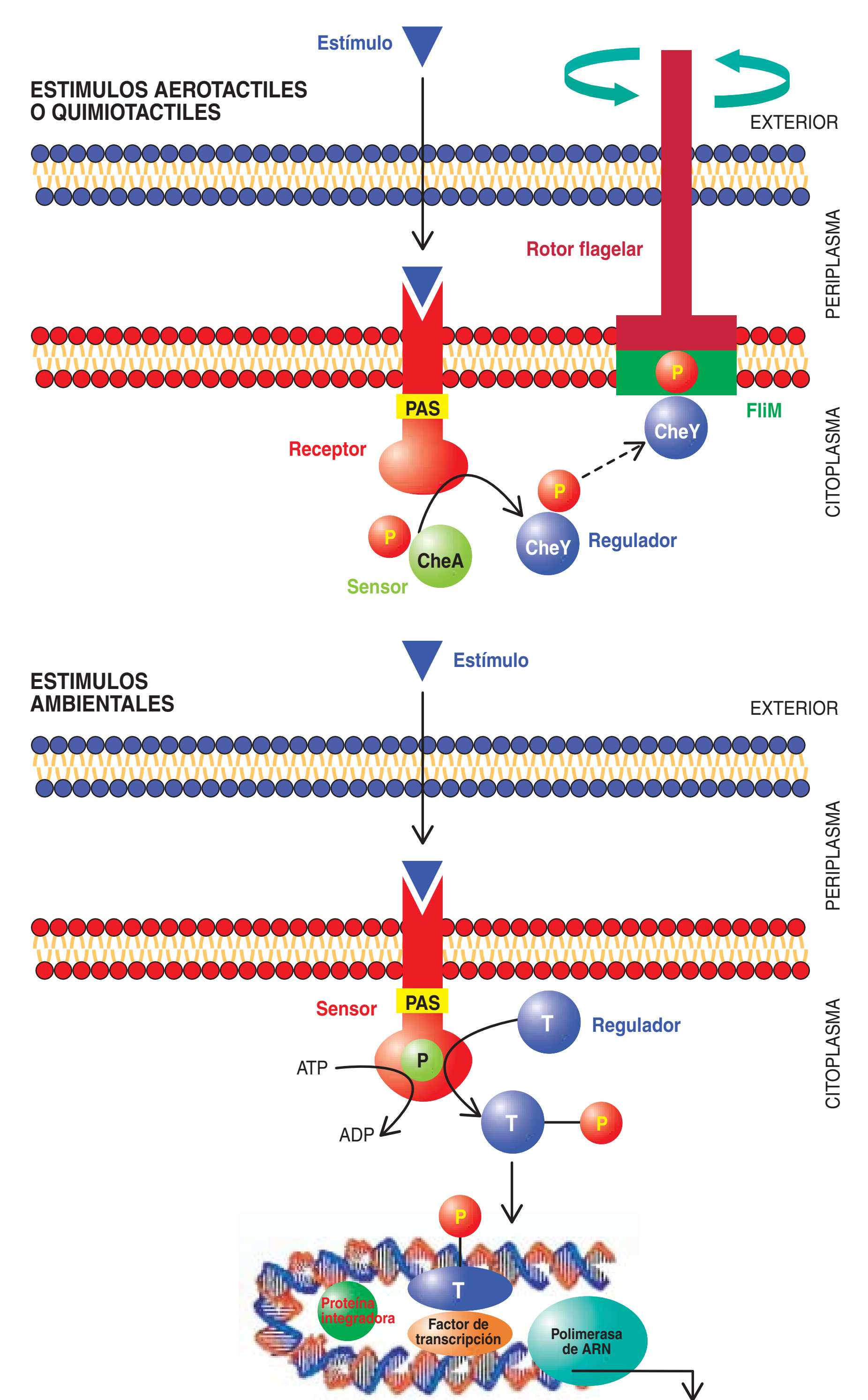


7. REDUCCION PERIPLASMICA DEL NITRATO por la bacteria fotosintética *Rhodobacter sphaeroides*. En la estirpe DSM 158 de *R. sphaeroides*, el sistema de proteínas periplásmico Nap reduce el nitrato a nitrito y éste se libera al medio. La estirpe sp. *denitrificans* de esta misma bacteria y, en general, las bacterias desnitrificantes poseen otras enzimas periplásmicas que reducen el nitrito secuencialmente a NO, N_2O y N_2. La desnitrificación aeróbica, recientemente descubierta, puede acoplarse a la oxidación, también aeróbica, del amoníaco a nitrito, por lo que sería una vía de escape a la atmósfera, en forma de gases nitrogenados, de todas las formas de nitrógeno fijado. Nap: proteínas del sistema reductor periplásmico de nitrato. Q/QH_2: quinona oxidada/reducida. MGD: Dinucleótido de molibdopterina y guanina.



8. PAPEL DEL PERIPLASMA EN EL TRANSPORTE DE SOLUTOS. La unión entre pequeñas moléculas y proteínas periplásmicas específicas facilita su transporte al citoplasma mediante la interacción de tres componentes: el periplásmico, un transportador transmembranal y una proteína unida a la membrana por el lado citosólico. Esta última utiliza la energía del ATP para impulsar el traslado del soluto a través del transportador.

FRANCISCO CASTILLO Y COLS.



9. PAPEL DEL PERIPLASMA EN LA TRANSMISION DE SEÑALES. La respuesta ante estímulos aerotáctiles o quimiotáctiles requiere un receptor de membrana y un par sensor/regulador (CheA/CheY) que transmite información a la base del rotor flagelar. Una sustancia repelente se une al receptor y activa la fosforilación en cadena (CheA-H-P → CheY-D-P) que determina un giro del rotor en el sentido de las agujas del reloj. Este tipo de giro hace que los flagelos no se muevan de forma coordinada (en huso) y la bacteria acaba por alejarse del repelente. Los cambios ambientales (presión de O_2, osmolaridad del medio y otros) se traducen en la fosforilación en cadena del par sensor/regulador y en la transmisión de la información a la maquinaria de transcripción de genes específicos de respuesta al estímulo.

FRANCISCO CASTILLO Y COLS.

ser citosólico. Una variante del sistema de dos componentes regula la esporulación en *Bacillus subtilis*.

Las señales extracelulares suelen ser luminosas o químicas. El sensor es una proteína con una secuencia denominada PAS de interacción entre proteínas y un dominio periplásmico, capaz de captar una señal extracelular. Esta señal causa una modificación estructural traducible a un cambio en una actividad enzimática desarrollada en el propio receptor o en una proteína asociada. La modificación en cadena de una serie de proteínas transductoras de la señal producirá un efecto final multiplicado en intensidad.

En el caso de la captación de estímulos promovidos por la luz (fototáctiles), el aire (aerotáctiles) o determinadas sustancias (quimiotáctiles), un receptor transmembranal con dominio PAS activa al par sensor/regulador. Así excitados, se acometen procesos de fosforilación, desfosforilación, metilación o desmetilación, que cambian el sentido de giro del rotor flagelar (a favor o en contra de las agujas del reloj). Resultado de ello, la bacteria parece orientarse hacia una zona o alejarse de la misma, según que el estímulo sea atrayente o repelente.

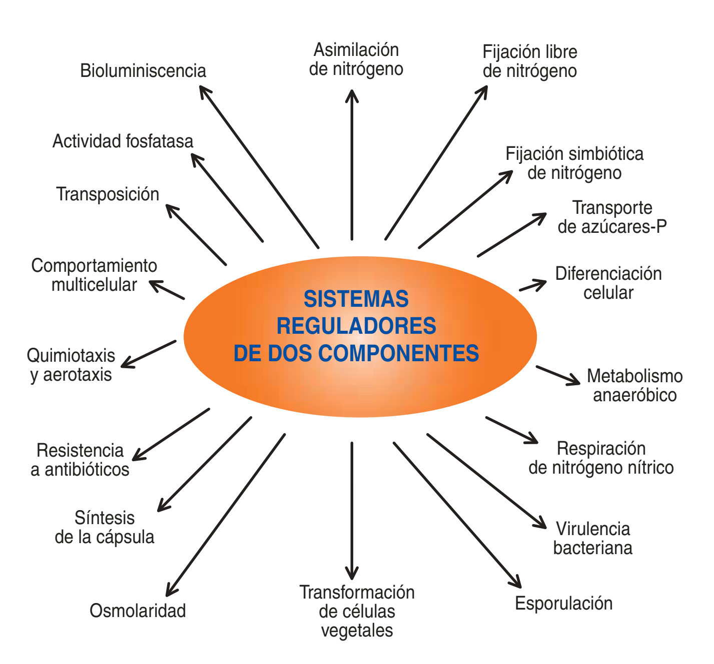
En un proceso de transducción de señales con dos componentes que regula la transcripción génica, el componente transmembranal (por ejemplo, una hemoproteína) capta las modificaciones operadas en el medio (una disminución de la presión parcial de oxígeno, quizá) mediante un dominio sensor expuesto al periplasma, sufre un cambio conformacional y transmite la señal al dominio citoplásmico, cuya actividad quinasa aumenta y se autofosforila en un residuo específico de histidina.

A continuación, el grupo fosforilo pasa desde la fosfohistidina hasta un residuo específico de aspartato del regulador. La nueva estructura creada posibilita su interacción con determinadas zonas del cromosoma. La unión específica entre regulador y ADN intensifica la transcripción de genes que codifican las proteínas necesarias para ejecutar una respuesta adecuada al cambio ambiental. Así,

la disminución de la presión de O_2 en los nódulos de las leguminosas sería la señal que activaría la transcripción de los genes que codifican proteínas necesarias para la fijación de dinitrógeno.

Las bacterias cuentan con sistemas similares para responder a cambios relacionados con la disposición de nutrientes, la osmolaridad del medio o la presencia de nitratos, además de regular procesos de virulencia, transformación celular, otros tipos de movimiento bacteriano y múltiples fenómenos más.

En las levaduras, y a veces en las plantas, la respuesta a alguno de estos estímulos conserva un par sensor/regulador modificado, intercalando entre ambos un módulo de quinasas citoplasmáticas. Se ha demostrado que los módulos de quinasas desempeñan un papel crítico en la transducción de señales en las células animales y conectan sensores más evolucionados (los receptores de membrana) con una pléyade de factores de transcripción nucleares que proporcionan respuestas metabólicas, de crecimiento celular o de desarrollo embrionario.



10. PROCESOS REGULADOS POR SISTEMAS DE DOS COMPONENTES. Los sistemas de dos componentes regulan una gran variedad de procesos fisiológicos y metabólicos bacterianos. En algunos de ellos, existe algún otro componente que facilita la transmisión de la señal. En otros casos, la fosforilación en histidina o aspartato tiene lugar en la misma cadena peptídica.

En el periplasma de una bacteria se localizan más de 150 proteínas diferentes. Predominan las holoproteínas, integradas por una o varias cadenas polipeptídicas unidas a diferentes cofactores (iones metálicos, centros sulfoférricos, grupos hemo, dinucleótidos y otros).

Para cumplir su función asignada, las proteínas deben hallarse debidamente plegadas en una conformación tridimensional definida. El plegamiento viene determinado por la propia secuencia de aminoácidos, aunque cuando se trata de proteínas de gran tamaño demanda el concurso de otras proteínas.

Los catalizadores del plegamiento aceleran los pasos limitantes del proceso. Nos referimos a la formación de puentes disulfuro, mediada por la isomerasa de puentes disulfuros proteicos (PDI), y a la interconversión *cis-trans* del enlace peptídico en torno a residuos de prolina, catalizada por la isomerasa de peptidil-prolina (PPI). Por otro lado, las chaperonas moleculares y chaperoninas actúan evitando las interacciones incorrectas durante el plegamiento proteico con consumo de energía metabólica en forma de ATP.

Las condiciones del periplasma dificultan el plegamiento de las proteínas periplásmicas. Por detallar algunas: las reducidas dimensiones del espacio, su vulnerabilidad a los cambios de *p*H, temperatura y osmolaridad, su carácter relativamente oxidante, la necesidad de ciertos puentes disulfuro entre cisteínas para estabilizar las proteínas, la ausencia de chaperonas moleculares y del ATP necesario para la actividad de dichos asistentes del plegamiento proteico. No obstante, en el periplasma residen los catalizadores de plegamiento, y las isomerasas PPI y PDI.

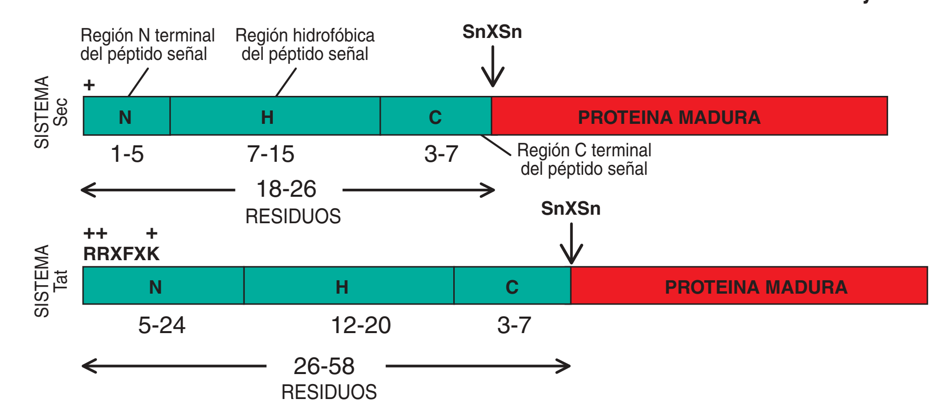
¿Qué tipos de señales determinan la localización periplásmica de una proteína? ¿Qué pasos se requieren para la biogénesis de proteínas periplásmicas funcionales? ¿Son necesarios los cofactores para la exportación de las holoproteínas? Las respuestas a estas y otras preguntas han empezado a vislumbrarse en los últimos años gracias a la combinación de los estudios bioquímicos con la información suministrada por la secuenciación de varios genomas bacterianos.

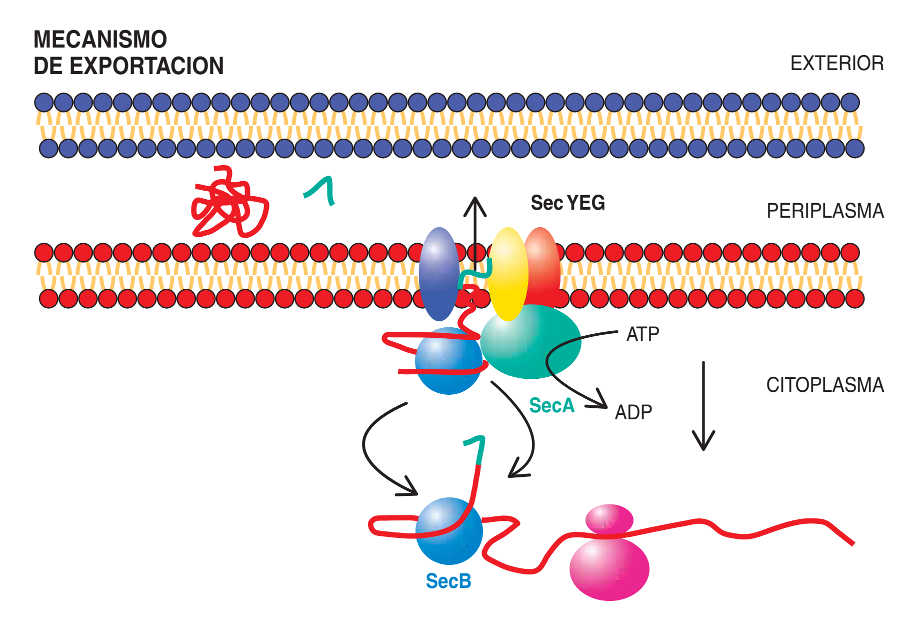
Todas las proteínas periplásmicas se sintetizan en el citosol, con una presecuencia hidrofóbica en el extremo amino terminal, llamada péptido de tránsito o secuencia señal, que determina su transporte a través de la membrana plasmática por dos sistemas de translocación diferentes: el sistema general de secreción Sec y el sistema Tat, de translocación de arginina, específico de proteínas periplásmicas con cofactores.

De las dos translocasas, el sistema mejor estudiado es el Sec. Requiere energía en forma de ATP y gradiente electroquímico de protones, se inhibe por azida sódica y utiliza como sustrato apoproteínas sin plegar. Básicamente, el sistema consta de tres proteínas de membrana, una proteína periférica y una chaperona. Las proteínas de membrana (SecY, SecE y SecG) forman un canal para el paso de la cadena polipeptídica; la proteína periférica, con actividad ATPasa (SecA), dirige y gobierna el proceso de secreción, y la chaperona (SecB) reconoce las preproteínas en formación y las dirige hacia el complejo de translocación. También participan otras dos proteínas de membrana (SecD y SecF), que estabilizan la ATPasa.

Cuando una preproteína emerge del ribosoma durante la síntesis proteica en el citosol, lo primero que aparece es el péptido señal.

FRANCISCO CASTILLO Y COLS.





11. EXPORTACION DE PROTEINAS AL PERIPLASMA. La peptidasa de la señal corta tras la secuencia SnXSn, donde Sn es un aminoácido con cadena lateral pequeña y neutra (generalmente alanina) y X es cualquier aminoácido (*arriba*). En la secuencia con cargas positivas para translocación por el sistema Tat, R es arginina, F es fenilalanina y K es lisina. Abajo se ilustra el mecanismo molecular de la exportación de proteínas al periplasma mediante el sistema Sec.

FRANCISCO CASTILLO Y COLS.

Consta esta presecuencia de unos 18-26 aminoácidos, que definen tres regiones: el dominio N en el extremo amino terminal, con una o varias cargas positivas (Arg o Lys), el dominio H, una región central hidrofóbica con tendencia a formar α-hélice, y el dominio C, una zona polar con la secuencia consenso Ala-X-Ala (X es cualquier aminoácido).

Este último dominio es reconocido por la peptidasa de la señal, una proteína encargada de eliminar dicha presecuencia en el periplasma. Las preproteínas, reconocidas a su vez por la chaperona SecB, se encaminan hacia el complejo de translocación; algunas podrían pasar directamente sin participación de SecB. Pero si la secuencia señal es muy hidrofóbica, de las preproteínas se encarga entonces una ribonucleoproteína bacteriana denominada Ffh, que las inserta en la membrana o las transfiere hasta el complejo Sec de translocación.

El sistema Tat de translocación de holoproteínas se ha identificado recientemente. Las proteínas periplásmicas con cofactores presentan unos péptidos de tránsito algo mayores, de 26 a 58 aminoácidos, con un motivo especial de dos argininas adyacentes en el dominio N de la presecuencia. Sobre esta secuencia señal actúa una translocasa Tat. Este sistema, que es insensible a la azida y transporta las holoproteínas ya plegadas y unidas a sus cofactores, está constituido por un complejo de cuatro proteínas de membrana codificadas por los genes *tatABCD*.

Las proteínas periplásmicas pequeñas que carecen de cofactor se exportan desplegadas por el sistema Sec y adoptan su conformación nativa en el espacio periplásmico, tras perder el péptido de tránsito por la acción de la peptidasa de la señal. La vía Sec también participa en la biogénesis de los citocromos *c* bacterianos, que son proteínas pequeñas con un grupo hemo. La unión del hemo a residuos de cisteína se realiza en el periplasma en un proceso de varios pasos. Por último, las proteínas grandes con cofactores, como la nitrato reductasa periplásmica, una enzima de 90 kilodalton con más de 800 aminoácidos, un centro de hierro-azufre y un bis-dinucleótido de molibdopterina y guanina como cofactor, son transportadas por el sistema Tat en su conformación nativa, es decir, plegadas y unidas a sus cofactores.

No se puede pedir más a un espacio tan limitado de unos microorganismos tan simples.

Bibliografía complementaria

THE PERIPLASMIC SPACE AND THE PERIPLASM IN GRAM-POSITIVE AND GRAM-NEGATIVE BACTERIA, T. J. Beveridge, en *ASM News*, vol. 61, número 3, págs. 125-130, 1995.

PERIPLASMIC NITRATE-REDUCING SYSTEM OF THE PHOTOTROPHIC BACTERIUM *RHODOBACTER SPHAEROIDES* DSM 158: TRANSCRIPTIONAL AND MUTATIONAL ANALYSIS OF THE NAPKEFDABC GENE CLUSTER. F. Reyes, M. Gavira, F. Castillo, C. Moreno-Vivián, en *Biochemical Journal*, vol. 331, págs. 897-904, 1998.

BROCK. BIOLOGÍA DE LOS MICROORGANISMOS, octava edición, M. T. Madigan, J. M. Martinko, J. Parker. Prentice-Hall, Madrid, 1998.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Wolfgang Bürger

Escalones de agua

En un determinado punto el agua que cae sobre el plato, el fregadero o al pie de la presa se levanta como un escalón. Pero, ¿dónde exactamente? La respuesta requiere una excursión por la teoría del vuelo supersónico

Salto de agua: Enjuagar un plato no tiene ningún arte. Lo aguantamos bajo un chorro de agua y pasamos por alto un pequeño milagro de la naturaleza.

Tomemos un plato llano. Los hondos platos soperos se llenarían de agua, que ahogaría el fenómeno en un pequeño estanque. No abriremos demasiado el grifo del agua, para no proyectar fuera del plato lo que queremos observar. Si el plato llano fuera todavía demasiado hondo, probemos con su base; el anillo de apoyo de la porcelana servirá para "represar" el agua. Si mantenemos el plato horizontalmente bajo la corriente y dirigimos lo mejor posible el chorro a su centro, el flujo será circularmente simétrico alrededor del chorro, simetría que simplificará nuestra descripción. La entrada de agua se controla con el grifo. Además de la cantidad de agua por unidad de tiempo que fluye hacia el plato, el proceso depende de la velocidad con la que incida en éste, que se puede regular eligiendo, dentro de unos límites, la altura de la caída del chorro de agua. Para un chorro muy fino, la distancia entre el plato y el grifo no debería ser tan grande como para que el chorro se descompusiese en gotas antes de tocar la loza.

El plato desvía el agua suavemente, sin salpicar, en la dirección horizontal. Una corriente de agua bien regulada se "dispara" (así lo denominan los expertos en hidráulica) en todas direcciones; se aleja del chorro y toma la forma de una película de líquido. Al llegar a determinado radio, se alza. Se crea un "salto de agua" circular, una pared anular, atravesada por la corriente. En esa subida brusca de su nivel, el líquido, además, se arremolina. Detrás de este "escalón de presa" sin muro fluye el agua en una capa más gruesa, y tanto más despacio cuanto más gruesa, hasta que se derrama por el borde del plato.

Quien alguna vez haya visto un salto de agua sobre el plato, reconocerá con facilidad saltos de agua circulares, parabólicos y de otras formas allá donde caigan chorros sobre superficies sólidas; los verá en la pila de la cocina (*véase la figura 1*), en la bañera, bajo la ducha o en el asfalto de la calle bajo un fuerte aguacero.

Supersónico: Estos saltos de agua asombran por sí mismos. Aún más notable es, sin embargo, su parentesco físico con la onda de choque que emite un avión cuando rompe la barrera del sonido. Se trata de algo más que de una analogía, pese a que las ondas sonoras se propagan espacialmente mientras que las del agua sólo lo hacen en una capa superficial.

Los aviones en vuelo supersónico nos sobrepasan de manera inaudible, en el sentido más estricto de la palabra. Los vemos venir, ya que la luz se propaga casi un millón de veces más rápido que el sonido. Pero sólo cuando el avión hace ya un rato que ha volado sobre nosotros, nos hace saber el sonido de su paso con dos ondas de choque breves y muy seguidas que parten de la proa y de la cola del fuselaje. Las ondas sonoras que nos informan del sobrevuelo no vienen del lugar en el que se encuentra el avión en ese mismo instante, sino del sitio desde donde fueron emitidas (*véase la figura 2*).

Ondas sonoras y ondas de agua superficiales: La velocidad del sonido $c_s = \sqrt{\gamma p/\rho}$ (presión p, densidad ρ, exponente adiabático $\gamma = 1{,}40$) es para las ondas de compresión en el aire lo que la velocidad $c_v = \sqrt{gh}$ (profundidad del agua h, gravedad terrestre g) es a las ondas en la superficie de una capa de agua delgada. El agua que fluya más rápidamente que dicha velocidad, es decir, el agua "disparada", arrastrará las ondas superficiales. Por ello, éstas no podrían transmitir al interior ninguna información desde una eventual presa que se alce en el borde del plato —el reborde del plato—, tal y como las ondas sonoras no pueden adelantar a un avión supersónico. Ondas sonoras y ondas superficiales en una capa fina de agua tienen en común que todas sus longitudes de onda se propagan a la misma velocidad.

Cuando la velocidad de propagación de una onda depende de su longitud de onda, se dice que el me-

MARK CRAMER, VIRGINIA TECH



1. Salto de agua en un fregadero

dio tiene dispersión. Si se diera en el caso de ondas sonoras, sería catastrófico para la transmisión de la música. En las salas de conciertos se propagarían las notas de diferentes alturas a diferente velocidad y se generaría en cada oído, en cada lugar, una mezcla distinta, un sonido distinto.

Si tiramos, en cambio, una piedra a un estanque, observaremos la dispersión de las ondas superficiales. La razón es que ésas son aguas profundas. Los estanques siempre son "profundos" para las ondas superficiales, que se desplazan en ellos tanto más deprisa cuanto mayor sea su longitud de onda (ondas de longitud de onda λ con velocidad $c_\lambda = \sqrt{g\lambda/(2\pi)}$). De ahí que en la superficie del agua se vea pasar las olas largas por debajo de las cortas y cargárselas temporalmente sobre las espaldas.

Radio del salto del agua: Pero, ¿cómo "sabe" el agua dónde tiene que pasar de "ir disparada" a fluir despacio? El camino es "complejo". Se compone de varios procesos:

El agua

➤ sale de la cañería, con lo que una corriente tubular se convierte en un chorro libre;

➤ se precipita en caída libre contra el plato;

➤ sufre entonces una deflexión que la convierte en un flujo laminar y se "dispara" radialmente hacia fuera, con velocidad supercrítica; no recibe ninguna señal desde el salto de agua hacia el que fluye;

➤ sigue fluyendo más allá del salto hacia fuera, muy despacio, hasta el borde del plato, y

➤ entre estas dos fases su nivel sube abruptamente y crea así el salto de agua, cuya situación y altura vienen determinadas por las condiciones de la corriente en sus dos "orillas".

Dentro del salto de agua mismo, el líquido conoce un movimiento más violento, turbulento, que presenta a los teóricos las mayores complicaciones. Ciertas magnitudes del sistema —la velocidad de la corriente y el nivel del agua— varían muy deprisa en poco espacio. El salto de agua tiene en común con la onda de choque supersónica ambas propiedades; por eso los físicos escogen para resolver estos dos problemas una vía parecida. Derogan excepcionalmente el sagrado principio que reza: "La naturaleza no da saltos".

TEORIA DEL SALTO DE AGUA

Del fregadero a la hidrología

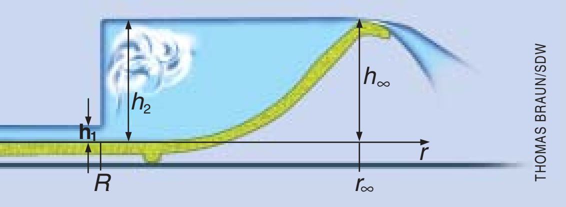
En cuanto cae agua del grifo como un chorro libre, la pared de la tubería deja de retener el agua y es la fricción interna de ésta la que iguala velocidades en la sección transversal del chorro. Al mismo tiempo, la gravedad acelera el agua a un ritmo $g = 9{,}81$ m/s^2. Ambas influencias hacen que el chorro sea más fino a medida que va cayendo. Para una velocidad media v_0 en la sección transversal de salida de radio r_0, caerá del grifo una "corriente volumétrica" (volumen de agua por unidad de tiempo) $Q = \pi r_0^2 v_0$. Puesto que consideramos un sistema en equilibrio dinámico, por cada superficie que nos imaginemos en medio del recorrido del agua fluirá el mismo volumen de agua Q. En particular, caerán Q centímetros cúbicos de agua por segundo por el borde del plato. Después de que la velocidad del agua en el chorro haya aumentado, tras la caída de altura ℓ hacia el plato, hasta alcanzar una magnitud $v_a = \sqrt{v_0^2 + 2g\ell}$, el chorro sólo tendrá un radio de $r_a = \sqrt{Q/(\pi v_a)}$.

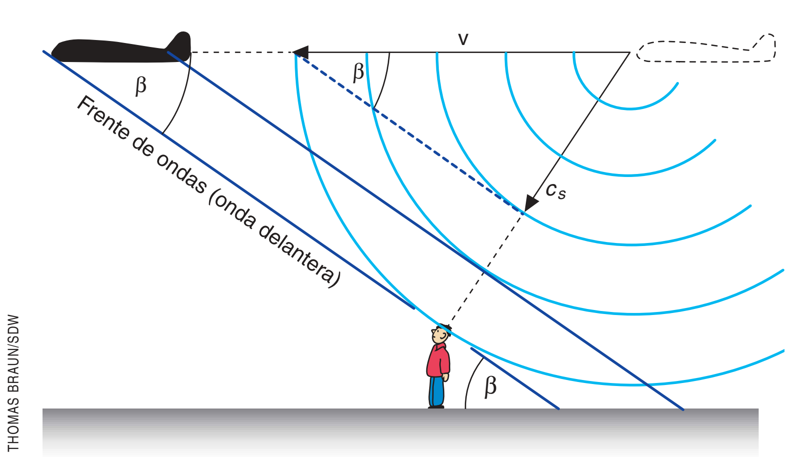
En el plato, el agua se desplaza con suavidad de manera horizontal y continúa fluyendo hacia todos los lados en forma laminar. Ya que en esta desviación no se pierde energía de forma apreciable, la velocidad del agua v_a sigue manteniéndose constante. La condición $v_a > \sqrt{gh_a}$ para el movimiento "disparado", que corresponde al movimiento supersónico en las corrientes de gases, se cumple para pequeñas caídas.

En cambio, es difícil de evaluar cuánto frena después la fricción del fluido el chorro plano sobre la loza. En lo que sigue asumo el riesgo de sobrestimar el radio del salto de agua despreciando totalmente la fricción. Bajo estas condiciones, la velocidad v en el chorro para una corriente estacionaria es, según la ecuación de Bernoulli, constante en el espacio y en el tiempo e igual a v_a; a partir de la corriente de volumen $Q = 2\pi r h v_a$ se puede determinar la altura de la capa de agua a cualquier distancia r del centro.

La catástrofe aparece inesperadamente para un radio R, donde la altura de agua $h_1 = Q/(2\pi R v_a)$ aumenta repentinamente hasta h_2. Debido a la constancia de la corriente volumétrica Q, que aparece en la "ecuación de continuidad"

$$\text{(A)} \qquad \frac{Q}{2\pi R} = h_1 v_a = h_2 v_2$$





2. Desde el suelo, un observador puede determinar la velocidad de vuelo $v = c_s/\text{sen}\,\beta$ a partir de la velocidad del sonido c_s y del ángulo de apertura del cono de Mach (el ángulo β respecto al horizonte, con el que se ve el avión cuando se percibe la primera señal acústica)

Si nos fijamos con atención, el nivel del agua en el salto no está conformado como el escalón de una escalera, vertical y recto. No obstante, es útil suponer que es como un escalón a la hora de construir un modelo de la situación. La variable h, que describe la altura del nivel del agua, resulta en tal aproximación discontinua. Algunas leyes físicas no se pueden entonces utilizar, porque son ecuaciones diferenciales. En éstas hay magnitudes que no sólo tienen que ser continuas, sino también diferenciables; la ecuación no tendría sentido en caso contrario. La diferenciabilidad exige que el cambio de altura entre dos puntos tienda rápidamente a cero a medida que se van tomando puntos cada vez más cercanos entre sí. Eso es precisamente lo que no pasa en una discontinuidad.

Así que los físicos deben encontrar en estos casos nuevas condiciones ("condiciones de transición") que vinculen los estados a ambos lados de la discontinuidad. Para ello recurren a principios que en el caso diferencial no desempeñan ningún papel. Resulta interesante que para la onda de choque supersónica ese principio sea el de la entropía, según el cual ésta, la medida termodinámica del desorden, ha de aumentar tras el choque.

la velocidad de la corriente disminuye simultáneamente hasta un valor v_2. Detrás del salto de agua, ésta fluye más lentamente. Como $v_2 < \sqrt{gh_2}$, ahí las ondas sí pueden transportar a tiempo información sobre la altura del nivel del agua de un sitio (borde del plato) a otro (salto del agua).

Al pasar por el salto de agua se "quema" energía del movimiento (se convierte en calor): la corriente de agua pierde energía mecánica. Otra parte de la energía cinética sirve para elevar el agua del nivel h_1 al h_2 en contra de la gravedad. En la medida en que la presión hidrostática aumenta en la capa de agua, el impulso de la corriente se reduce. Esto proporciona la segunda relación del salto: $2h_2/h_1 = \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1$. El número de Froude $F_1 = v_a/\sqrt{gh_1} > 1$ se define como la razón entre la velocidad de la corriente y la velocidad de las ondas justo delante del salto de agua; corresponde al número de Mach en la corriente supersónica. Para el experimento del plato se supone que el salto de agua es "fuerte" (F_1 mucho mayor que 1). Bajo esta premisa la relación del salto se simplifica, y queda la ecuación

$$(B) \qquad h_2^2 = 2v_a^2 h_1/g.$$

(A) y (B) son sólo dos ecuaciones. Tres las magnitudes R, h_2, v_2 del salto de agua que se buscan. La tercera ecuación nos la proporciona el desagüe: el borde realzado del plato es una "presa" plana similar a las que utilizan los ingenieros de obras públicas para regular la corriente de agua en canales abiertos. En la práctica, la forma circular no está fuera de lo común.

La corriente de agua, que se ha ralentizado mucho en el salto de agua con $r = R$, tiene que continuar su viaje para poder abandonar el borde del plato con $r = r_\infty$. La aceleración necesaria la recibe de un desnivel: desde $r = R$ hasta $r = r_\infty$ el nivel del agua baja levemente —tan poco que se puede despreciar este hundimiento comparado con la altura total del nivel del agua, al igual que el grosor de la película de agua que se vierte—. Así pues, la tercera ecuación que determina las magnitudes se simplifica mucho:

$$(C) \qquad h_2 = h_\infty$$

El nivel del agua en el salto es tan alto como el reborde del plato.

De (A), (B) y (C) se obtiene el radio del salto de agua:

$$R = \frac{Qv_a}{(\pi g h_\infty^2)} \quad \text{con } v_a = \sqrt{v_0^2 + 2g\ell} \text{ y } v_0 = Q/(\pi r_0^2)$$

El radio R crece así con la corriente volumétrica Q y la velocidad de incidencia v_a, mientras que decrece a medida que aumenta la altura h_∞ del borde del plato. Para valores creíbles de los parámetros (Q = 78 cm^3/s, $h_\infty = r_0$ = 0,6 cm, ℓ = 10 cm y g = = 981 cm/s^2) se obtiene R = 11 cm. Si se tuviera en consideración la fricción interna del agua, resultaría un valor numérico probablemente menor.

Juan M.R. Parrondo

Ruidos reveladores

Entender a alguien que nos habla en una estación en el momento en que llega un tren es una tarea difícil. El estruendo del tren se suma al sonido de la voz de nuestro interlocutor y es imposible separar la "señal" del "ruido". En cualquier canal de comunicación físico, desde las ondas sonoras con las que nos hablamos los unos a los otros hasta las ondas electromagnéticas en las que viajan las imágenes que vemos en la televisión, existen fuentes inevitables de interferencias o "ruido" que se añade a la señal transportada. Este ruido dificulta la recepción del mensaje y puede incluso distorsionarlo y hacerlo ininteligible. En técnicas de comunicaciones, el ruido es algo poco deseable y se han desarrollado métodos para contrarrestarlo, como la teoría de corrección de errores. Sin embargo, existen situaciones en las que, sorprendentemente, el ruido puede favorecer la escucha.

Supongamos una cierta "retina artificial" que, al contemplar una imagen, pueda únicamente transmitir por cada punto un bit de información, es decir, puede tan sólo transmitir si el punto es negro o blanco. Supondremos que esta retina, al recibir la luz de una imagen en blanco y negro pero que contiene toda la escala de grises, decide que cada punto de la misma es negro si el gris correspondiente a ese punto está por debajo de determinado umbral y blanco si está por encima. Este proceso, que se puede realizar en la mayoría de los programas informáticos de tratamiento de imágenes y fotografías, se denomina posterizar, puesto que ésta fue la técnica utilizada para obtener el famoso póster del Che Guevara en los años setenta.

Si el umbral es muy alto, la retina transmitirá una imagen prácticamente negra y será de poca utilidad. Esto es lo que ocurre con la imagen de Einstein en la figura 1. Podemos decir que la retina, con este umbral, es "ciega". Su sensibilidad es demasiado baja y no percibe los grises que definen la figura de la fotografía. Veamos qué ocurre si añadimos un poco de ruido a la imagen, es decir, si a la luminosidad de cada uno de sus puntos le añadimos un número aleatorio. Este ruido es muy parecido al que distorsiona la imagen de un canal de televisión mal sintonizado, como pueden comprobar en la figura. El rostro de Einstein se ve también distorsionado y su visión es incómoda para un ojo normal. Sin embargo, para nuestra torpe retina el ruido es bastante útil. En la posterización de la imagen ruidosa, Einstein es ya reconocible, algo que no ocurría con la posterización de la imagen nítida y sin ruido. En este ejemplo, el ruido ayuda a ver. Por supuesto, si añadiéramos una mayor cantidad de ruido, la información se perdería y la posterización no recuperaría la imagen original. Existe una cantidad de ruido óptima, para la cual la imagen se recupera con mayor fidelidad. Este fenómeno se denomina resonancia estocástica. Ocurre en algunos sistemas que responden ante ciertos estímulos o señales externas y en los que algo de ruido añadido a la señal es capaz de mejorar la respuesta.

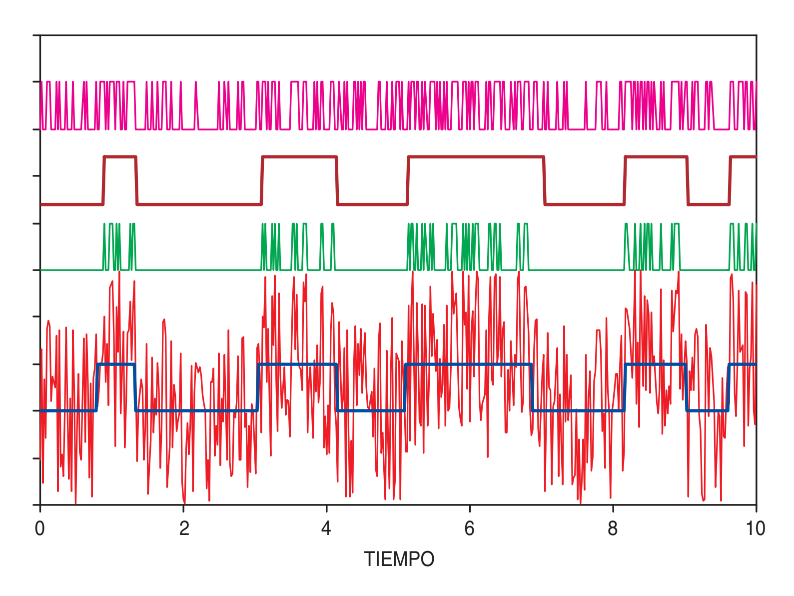




1. Einstein y sus correspondientes posterizaciones: en la columna de la izquierda se muestran las imágenes antes de posterizar y en la columna de la derecha las imágenes posterizadas. La fotografía original se muestra arriba a la izquierda y debajo la imagen con un ruido de 70 unidades (la gama de grises utilizada va de 0 a 255 y se ha tomado 225 como umbral de posterización)

En un primer momento parecería que la resonancia estocástica es de poca utilidad. ¿Por qué debería una retina confiar en el ruido para que se desvelaran los perfiles del mundo que tiene delante? ¿No es mejor aumentar la sensibilidad, es decir, disminuir el umbral, de modo que la retina pueda ver sin necesidad de ruido?

Esta estrategia puede resultar conveniente en ocasiones, pero una excesiva sensibilidad es completamente ineficaz cuando el ruido está siempre presente y es intenso. En la figura 2 se ofrece una situación de este tipo. La curva azul representa una señal que toma sólo dos posibles valores en el tiempo, 0 y 0,5, y que podría ser un mensaje en código Morse o en lenguaje binario. Como señal he elegido saltos al azar en el tiempo de una duración media de uno o dos segundos. A la señal se superpone un ruido cuya magnitud es comparable a la propia señal. Este ruido no es más que un número tomado al azar entre –1 y 1 que he sumado a la señal original. El resultado es la gráfica roja.



2. La curva azul representa una señal distorsionada por un ruido. En rojo se puede ver la suma de la señal y el ruido, la entrada de nuestro sistema detector. Un sistema con umbral por debajo de la señal tiene la respuesta dada por la curva rosa. Sin embargo, sistemas menos sensibles responden mejor, como ocurre con la curva verde y marrón. Las escalas del eje vertical son arbitrarias y se han elegido para que se puedan ver claramente las respuestas de cada sistema

Si quisiéramos diseñar un sistema que detectara la señal, en principio pensaríamos en uno cuyo umbral estuviera por debajo de 0,5, es decir, un sistema que disparara si detectase una entrada por encima de 0,5. La respuesta de este sistema es la curva rosa de la figura 2. El ruido es tan intenso que el sistema está completamente confundido: dispara de un modo prácticamente independiente de la señal, ya que el ruido hace que en muchas ocasiones la entrada al sistema, es decir, la curva roja, supere el umbral aun siendo nula la señal. Sin embargo, un sistema con un umbral más alto (con una sensibilidad menor) se comporta bastante mejor. La curva verde representa la respuesta de un sistema cuyo umbral es 1. Este sistema sí capta los intervalos de tiempo en donde la señal es nula y aquellos en donde la señal es 0,5. Aún mejor es el sistema cuya respuesta viene dada por la curva marrón. En este caso hemos programado al sistema para que dispare cuando la entrada supera un umbral igual a 1; ahora bien, una vez disparado, deja de hacerlo sólo si la entrada se halla por debajo de –0,5. Este sistema capta a la perfección la señal original. ¡Pero observen que lo hace teniendo como entrada única la curva roja, en la cual la señal parece completamente enmascarada por el ruido! Por supuesto, tanto el sistema de la curva verde como el de la curva marrón serían "ciegos" a la señal azul si a ésta no se le añadiera ningún ruido. Ambos sistemas de detección presentan resonancia estocástica. Son inútiles para señales con poco o con mucho ruido y sólo alcanzan un régimen de detección eficaz para ciertos valores intermedios de la intensidad del ruido (aunque en este caso, bastante altos, al menos comparados con la señal).

La resonancia estocástica parece ser útil para sistemas que tienen que detectar señales muy débiles, comparables con el ruido que las rodea. ¿Existe alguna aplicación práctica del fenómeno? Ha habido algún intento en ingeniería, pero sin demasiado éxito. Sin embargo, los seres vivos sí parecen utilizar la resonancia estocástica. El grupo de Frank Moss, de la Universidad de Missouri, realizó experimentos con el pez raqueta, que medra en las aguas del río Mississippi. Su alimentación básica consiste en plancton formado por pequeños organismos llamados dafnias. El pez raqueta detecta las dafnias a través del campo eléctrico que generan. El río es, en lo que se refiere a campos eléctricos, un entorno bastante ruidoso y el campo eléctrico generado por las dafnias es muy débil; se trata, pues, de una situación idónea para la resonancia estocástica. Moss y sus colaboradores pudieron comprobar que el sistema de detección del pez raqueta presenta el fenómeno de resonancia. Introdujeron a un pez raqueta en un estanque en el laboratorio en el que podían generar bajo control un campo eléctrico aleatorio, es decir, un ruido, y midieron su eficacia predadora en función de la intensidad del ruido eléctrico inducido. El resultado fue que la eficacia del pez aumentaba al aumentar la intensidad del ruido hasta un cierto valor, a partir del cual disminuía.

Desde que se descubrió en los años ochenta, la resonancia estocástica es un campo de investigación muy activo. El número de artículos con variaciones y nuevas propuestas de sistemas que "resuenan" con ruido o con fluctuaciones crece cada año. Y estoy seguro de que en el futuro asistiremos a nuevas y espectaculares aplicaciones del fenómeno, sobre todo en biología y en ingeniería.

Mark Fischetti

MEDICACION TOPICA

El poder de los parches

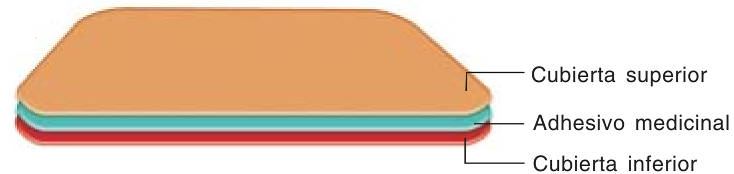
Tragarse una píldora es muy fácil. Pero aun así nos olvidamos de tomarlas a su hora. Y los niveles de fármaco en el torrente sanguíneo suben y bajan con cada dosis. Evitan tales problemas los parches medicinales de aplicación tópica.

El uso de "parches" se generalizó en torno a 1990, cuando los fumadores recurrieron a ellos para librarse del hábito. Una serie de parches, aplicados durante varias semanas, suministraban cantidades decrecientes de nicotina para apartar gradualmente al fumador de su adicción. Hoy se dispone de parches transdérmicos que suministran estrógenos en las terapias de sustitución de hormonas, nitroglicerinas para las anginas de pecho, escopolamina para los mareos de viaje, fentanil para el control del dolor, clonidina para la hipertensión y, recientemente, etinilestradiol con norelgestromina para la contracepción.

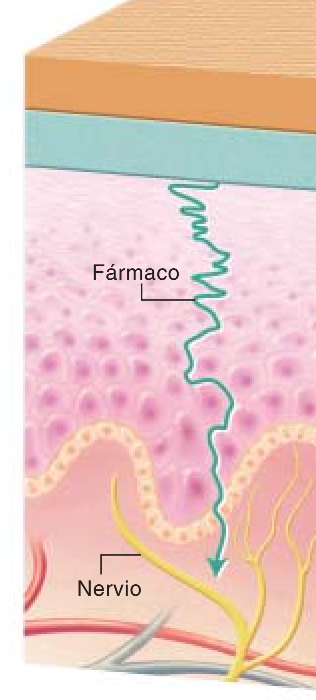
En la mayoría de los casos, el parche está saturado de fármaco, que se difunde continuamente a través de los poros y de los intersticios microscópicos de las células de la piel. El truco consiste en idear un adhesivo de polímero que, a la vez que retiene una determinada molécula de medicamento, permite que se difunda; el equilibrio es muy delicado, observa Sharon Grosh, de 3M Drug Delivery Systems.

La capa externa de células muertas de la piel (la capa córnea) es una buena barrera. Controla la velocidad de difusión. Las moléculas del medicamento deben ser lo bastante pequeñas para serpentear entre las células y, tras disolverse en los lípidos, adentrarse más en la piel, hasta llegar a los vasos capilares. Además, la capa córnea varía en espesor y porosidad de una persona a otra, por lo que es beneficioso que un fármaco posea un margen terapéutico amplio: no ha de ser tóxico a altas concentraciones sin perder su eficacia tampoco a bajas concentraciones, como afirma Mark R. Prausnitz, del Instituto de Tecnología de Georgia. Por estos azares, sólo un manojo de medicinas es efectivo en forma de parche.

Se está intentando modificar el parche pasivo con agentes activos capaces de impulsar moléculas de tamaño grande, solubles en agua o ambos, a través de la piel; es el caso de la insulina y las vacunas. Una corriente eléctrica procedente de una pila diminuta montada en el parche ensancharía los intersticios intermoleculares e introduciría por ellos moléculas ionizadas del fármaco. O bien, un conjunto de agujas microscópicas montadas en el parche podrían actuar a modo de embudos microscópicos que atravesasen la piel. Los modelos activos son más costosos y voluminosos que los pasivos, pero hay varios cuyos ensayos químicos han adelantado ya mucho.



1. LOS PARCHES MONOCAPA tienen una capa de polímero adhesivo que se pega a la piel y contiene el fármaco. Como todos los parches actualmente aprobados, constan de una cubierta superior y otra inferior que ocluyen el fármaco hasta que el usuario las desprende. La velocidad de difusión depende de la concentración del fármaco en el parche, la concentración de lípidos en la piel y la superficie de ésta que se cubre.



2. LAS MOLECULAS DE FARMACO procedentes de un parche se difunden a través de los lípidos que hay entre las células muertas de la capa córnea de la piel y más allá de las células vivas de la epidermis, hasta los capilares de la dermis, donde entran en el torrente sanguíneo.

ALICE Y. CHEN

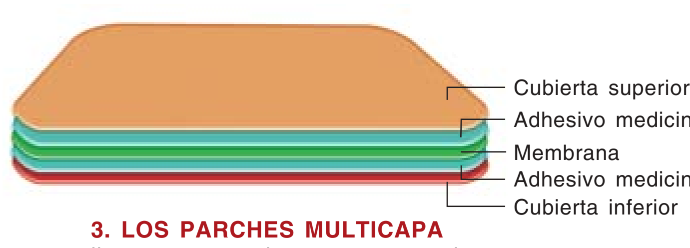
¿SABIA USTED QUE...?

➤ **TIRELO LEJOS:** Un parche dura sólo unas cuantas horas o días antes de que su velocidad de cesión del fármaco caiga por debajo de un umbral de eficacia. Entonces hay que retirarlo. Porque aún contiene medicamento, hemos de asegurarnos de que los niños o los animales domésticos no lo ingieran accidentalmente, pues podría ser tóxico e incluso letal.

➤ **VACUNAS:** Ciertas vacunas, como las del VIH o la gripe, podrían provocar una fuerte respuesta inmunitaria en las células de Langerhans de la epidermis. Pero las inyecciones y las píldoras no sirven, pues envían la vacuna al torrente sanguíneo. Si se consiguiesen parches que administrasen moléculas de vacunas –que son grandes—, podrían bañar las células de Langerhans y aumentar la eficacia de las vacunas.

➤ **PIEL GRUESA:** La capa córnea tiene su máximo espesor en las palmas de las manos y en las plantas de los pies, mínimo tras las orejas, en las axilas y en el cuero cabelludo. Tras la oreja abundan los vasos sanguíneos; es una zona excelente para los parches, aunque sólo admita los de pequeño tamaño. Las axilas y el cuero cabelludo suelen ser inadecuados porque los cabellos estorban. La mayoría de los parches acaban en el brazo, en la cara interna del muslo, en la zona lumbar o en el pecho, donde no se los ve y es menos probable que se arranquen.

➤ **¿SIN DOLOR?:** Las microagujas de los parches experimentales no duelen, pero sus creadores temen que el nombre asuste a los pacientes. Sus sinónimos — microproyectores o microcuchillas— no suenan mejor. Desde luego, se dará con un eufemismo cuando acaben los ensayos.



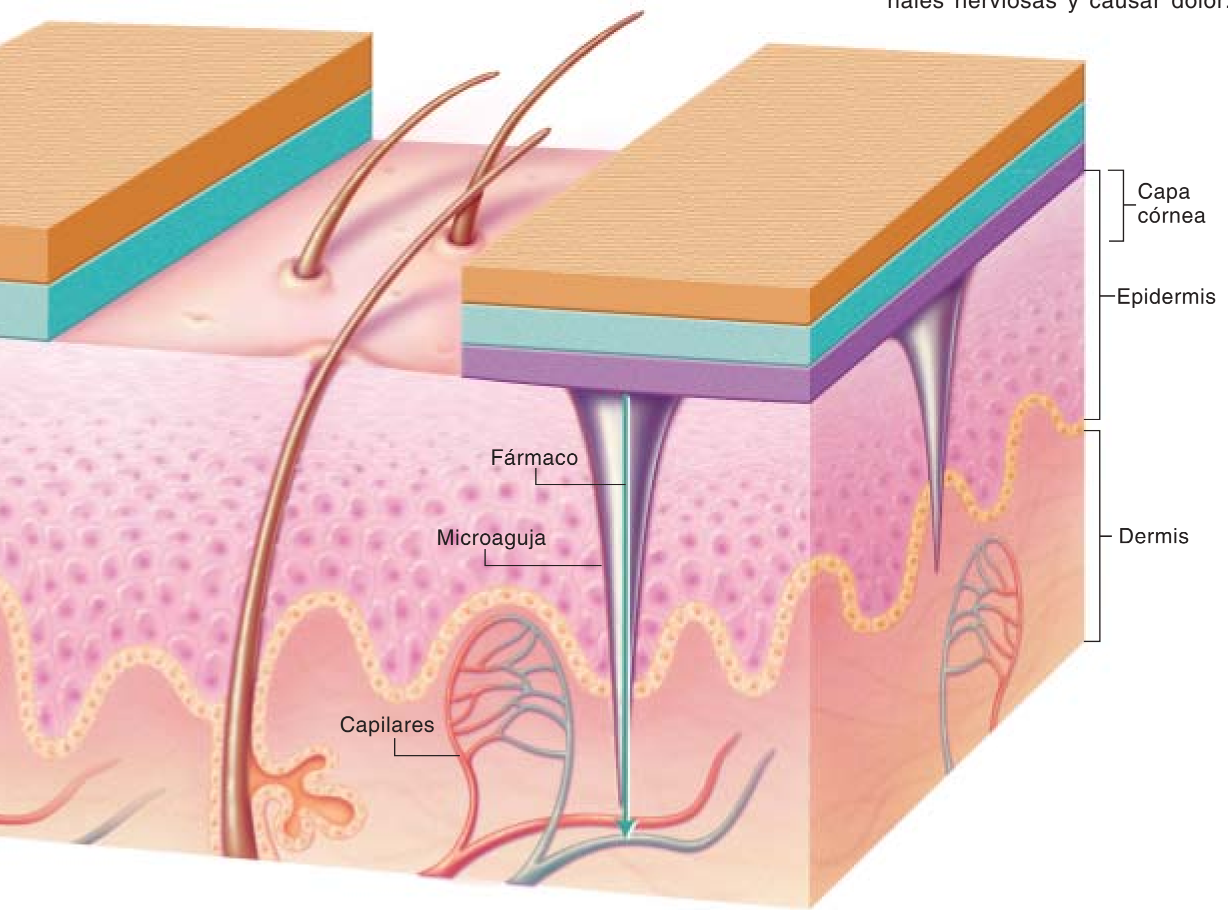
3. LOS PARCHES MULTICAPA llevan una membrana que controla la dosificación de los fármacos; en particular, la de los medicamentos proclives a difundirse con excesiva rapidez en la piel.

Cubierta superior

Depósito y adhesivo

Batería de microproyectores

4. LOS PARCHES DE MICROAGUJAS retienen los fármacos en un líquido o en un depósito de polímero. Unas agujas huecas, micromecanizadas, atraviesan la parte superior de la dermis, avanzando lo suficiente para llevar los fármacos hasta los capilares, pero sin llegar a tocar las terminales nerviosas y causar dolor.



Mathematica

Raíces y ecuaciones

ALKUINS EINFLUSS AUF DIE KOMPUTISTIK ZUR ZEIT KARLS DES GROSSEN, por Kerstin Springsfeld. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2002. JOHANNES DE TINEMUE'S REDACTION OF EUCLID'S ELEMENTS, THE SO-CALLED ADELARD III VERSION. Edición de H.L.L. Busard. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2001.

JESUITISCHE MATHEMATIK IN PRAG IM 16. UND 17. JAHRHUNDERT (1556-1654), por Georg Schuppener. Leipziger Universitätsverlag; Leipzig, 1999. PRAGER JESUITEN-MATHEMATIK VON 1600 BIS 1740, por Georg Schuppener y Karel Macak. Leipziger Universitätsverlag; Leipzig, 2002.

LA GÉOMÉTRIE ALGÉBRIQUE. RECHERCHES HISTORIQUES, por Christian Houzel. Edtions Albert Blanchard; París, 2002. NIELS HENRIK ABEL AND HIS TIMES, por Arild Stubhaug, Springer Verlag; Berlín, 2000. THE SEARCH FOR MATHEMATICAL ROOTS, 1870-1940: LOGICS, SET THEORIES AND THE FOUNDATIONS OF MATHEMATICS FROM CANTOR THROUGH RUSSELL TO GÖDEL, por I. Grattan-Guinness. Princeton University Press; Princeton, 2000.

WRITING THE HISTORY OF MATHEMATICS: ITS HISTORICAL DEVELOPMENT. Dirigido por Joseph W. Dauben y Christoph J. Scriba. Birkhäuser; Basilea, 2002.

La reforma y el renacimiento carolingio presentan, en su origen, un componente central matemático, que gira en torno al cómputo calendárico (*Alkuins Einfluss auf die Komputistik zur Zeit Karls des Grossen*). En el cálculo cristiano del tiempo importaba la determinación de la fecha de la Pascua. El domingo de Resurrección dependía del comienzo de la primavera, de la fase de la luna y el ciclo lunar, así como del día de la semana y el ciclo solar. Pero había un problema. En la alta Edad Media, la primavera no empezaba en la misma fecha en Oriente que en Occidente; ni, por ende, el domingo de Pascua coincidía en Roma y en Alejandría. En el siglo VI, Dionisio el Exiguo acompasó el cómputo romano al alejandrino. Unos 200 años más tarde, Beda el Venerable desarrolló el trabajo de Dionisio, agregando en la determinación la fecha del nacimiento de Cristo. Pero hasta el reinado de Carlomagno no se armonizó el cómputo dioníseo-bedista. Para lograrlo, el emperador llamó a un monje anglosajón, Alcuino de York (ca.735-804). Una vez en la corte, Alcuino se propuso convertir Aquisgrán en la nueva Atenas. A semejante empeño la historia le atribuye el "renacimiento carolingio". De su trabajo sobre el cómputo vivirá Europa largos siglos.

De Alcuino nos ha llegado un extenso epistolario. Algunas cartas de su correspondencia con el Rey abordan cuestiones de cómputo; es decir, cuestiones sobre la doctrina del cómputo del tiempo y, en relación con ello, cuestiones sobre los fundamentos astronómicos. Sobre estas cuestiones no hay siempre uniformidad. Las cartas reflejan el conflicto entre el cómputo romano y el alejandrino. Al último seguían algunos consejeros de Carlomagno, a los que en razón de ello Alcuino llamaba el "grupo de los egipcios". La correspondencia de Alcuino es, junto a la de Gregorio Magno, la más nutrida, con 270 epístolas propias y 40 de su respuesta pertinente. Constituyen una fuente impresionante para el conocimiento de la historia, el derecho, la política y la ciencia en Inglaterra y Franconia.

Gracias a la correspondencia astronómico-calculista conocemos la relación de Alcuino con escritos matemáticos anónimos del tiempo de Carlomagno. Se trata de *Ratio de luna*, sobre el curso de la Luna a través del Zodíaco; *De saltu lunae*, sobre el calendario lunar; *De bissexto*, sobre el año solar, y *Calculatio Albini magistri*, sobre el cómputo del domingo de Pascua.

Cómputo significa literalmente recuento, el recuento de cualquier suerte, desde el tiempo hasta la aritmética, los ciclos solares y lunares, la datación de efemérides. La principal tarea de ese cómputo era establecer la fecha exacta del primer domingo después de la Pascua judía, es decir, determinar el día de la primera luna llena de primavera. Así pues, resultaban fundamentales el mes lunar sinódico y el año solar, así como la semana judía de siete días, amén del equinoccio de primavera. El mes sinódico constaba de unos 29,5 días; de 19 años era el ciclo lunisolar; el año solar se prolongaba unos 365,25 días. Junto al cómputo escueto de la Pascua, se prestaba atención a otras cuestiones astronómicas. En una imagen geocéntrica del mundo, había que considerar el curso de siete astros errantes, o planetas: Luna, Mercurio, Venus, Sol, Marte, Júpiter y Saturno, según se contemplaban desde la Tierra. Se movían en el trasfondo de las estrellas fijas. En ese trasfondo, el Sol seguía un camino conocido, la eclíptica. El paso de la Luna a lo largo del Zodíaco constituía el mes sidéreo. Para comprender el problema de cómputo ayuda el calendario lunar de ciclo de 19 años.

A través de sus discípulos, la doctrina de Alcuino pervivió a su muerte. Adelhard (750-826) pudo ser el coordinador de los siete *Libri computi*, una enciclopedia sobre el tiempo. Arn (740-821), arzobispo de Salzburgo, reunió el epistolario de su amigo Alcuino y comenzó en el 818 otra enciclopedia carolingia sobre el cómputo, *Liber calculationis*. Su alumno más destacado fue Hrabanus Maurus (780-856), autor de un notabilísimo *De computo* y representante ilustre del saber franco.

Del renacimiento carolingio al resurgimiento científico del siglo XII. Se debió éste, en buena medida, al

movimiento traductor. Una de las primeras obras en trasladarse del árabe al latín fue el texto completo de los *Elementos* de Euclides, incluidos los libros XIV y XV, que, como es sabido, no pertenecen al matemático griego (*Johannes de Tinemue's Redaction of Euclid's Elements, the so-called Adelard III Version*). Con toda verosimilitud, afirma H. L. L. Busard, autoridad indiscutida en ese período, fue Adelardo de Bath el primero en presentar, en la segunda mitad del siglo XII, una versión completa. A lo largo de esa centuria, se produjeron diversas traducciones de los *Elementos*, incluida una directa del griego. Gozó de especial aceptación la llamada Versión II, una suerte de reelaboración más que una traducción en sentido estricto. En ella se fundó Campanus para su traslación, en el meridiano del siglo XIII, que se convirtió en canónica a lo largo de la baja Edad Media y se imprimió en el Renacimiento.

Sobre la denominada Versión III, redactada después de la II y objeto del libro de cabecera, se han disputado su autoría Adelardo y un tal "Johannes de Tinemue", personaje desconocido. Mas por razones de composición interna (entre otras, alusión a los *Analíticos posteriores* de Aristóteles, que Gerardo de Cremona tradujo del árabe en la segunda mitad del siglo XII) la balanza se decanta en favor del segundo. En efecto, la Versión III comparte peculiaridades estilística con *De curvis superficiebus*, un epítome, en diez proposiciones, de las pruebas de Arquímedes sobre la medición de las superficies y volúmenes de conos, cilindros y esferas, obra atribuida a Johannes de Tinemue. Así, se reseñan el común empleo del término *improbatio* para designar una refutación formal y el vocablo *dissolutio* para una prueba *per impossibile*.

En sí misma, la Versión III, cuya patria hemos de situar en Inglaterra, constituye uno de los primeros comentarios latinos sobre los *Elementos* de Euclides. Se vuelve en ella a la formalidad de las pruebas. En su introducción puede leerse una breve disertación sobre la clasificación de las ciencias, en la estela de los trabajos metodológicos de Hugo de San Victor y nuestro Domingo Gundisalvo. Leemos también algunos enunciados sobre unidades de medidas geométricas, extraídos en particular del *De disciplina geometrie*, de Gerbert.

"Euclides moderno" se llamó a Christoph Clavius (1537-1612), figura máxima que nos lleva al Renacimiento por antonomasia. Pocos objetan que la matemática que se conoce en Europa, desde la segunda mitad del siglo XVI y durante casi dos siglos, se difunde a través de los colegios de la Compañía de Jesús. Nos sirve de institución paradigmática el Clementinum de Praga (*Jesuitische Mathematik in Prag im 16. und 17. Jahrhundert (1556-1654*) y *Prager Jesuiten-Mathematik von 1600 bis 1740*), aunque pudiéramos haber elegido cualquiera de las biografías sobre el propio Clavius, Christoph Grienberger, Paul Guldin, Gregor de Saint Vincent, Johan Schall o Mario Bettini. O una vía indirecta, pues a través de una intensa correspondencia epistolar, se mantuvieron en contacto con los jesuitas Kepler, Mersenne, Huygens, Descartes, Galileo, Euler y un largo etcétera.



ANALYSIS SPECIOSA
TRIGONOMETRIÆ
SPHÆRICÆ:
PRIMO MOBILI:
Triangulis Rectilineis:
Progreſſioni Arithmeticæ & Geometricæ :
Aliiſque variis Problematis applicata
A R. PATRE JACOBO
KRESA
è Societate JESU
Opus Poſthumum
In lucem datum.
Cum Gratia & Privil. Sac. Caeſ. Regiaeq. Cathol. Majeſtatis.
PRAGÆ, Typis Univerſitatis Carolo-Ferdinandeæ, in Coll Societ. JESU ad S. Clementem, Anno 1720.

Portada de "Analysis speciosa" del jesuita Jakub Kresa

El Clementinum de Praga reviste, para la historia de la matemática, una importancia singular. Una de las primeras academias de la Compañía, precedida sólo por la fundación del Colegio Romano en 1551, se convirtió en punto de referencia para los nuevos establecimientos que se irán sembrando por el continente, con repercusión en la América española y en el Oriente Extremo. La elección de la capital de Bohemia, a instancias de Fernando I (1503-1564), se propuso como un contrapeso contra la Universidad Carolina. Había sido ésta fundada en 1348 por Carlos IV. Ahora, doscientos años después, profesores y alumnos habían abrazado en su mayoría el protestantismo. La excelencia docente que aportaba la Compañía era una cuña católica en un país que se había entregado a Lutero. Cierto es que, en 1556, cuando se abrieron las aulas del colegio, la universidad padecía una secular decadencia. Tras un período de rivalidad entre el Clementinum y el Carolinum, y varios intentos de aproximación, la unión de la Academia Jesuita y la Universidad Carolina se produjo finalmente en 1654. Las facultades de medicina y derecho permanecerían en el Carolinum, mientras que los jesuitas del Clementinum se reservaban las facultades de artes, filosofía y teología. Coincidió ese período con el impulso dado a la actividad científica y artística de Bohemia por Rodolfo II. El palacio de Praga alojó pintores de la talla de Adriaen de Vries, Hans von Aachen y Jan Breughel, astrónomos eminentes como Tycho Brahe, Johannes Kepler, Taddaeus Hajek von Hajek y Jost Bürgi, amén de creadores de instrumentos, Erasmus Habermel o Hein-

rich Stolle entre ellos, que fabricaron relojes, esferas, esferas armilares, etcétera, de óptima calidad.

El valor concedido al dominio de las ciencias exactas (matemática y astronomía) se destaca ya en las propias constituciones de san Ignacio, en la circular de 1559 del Prepósito General Laínez sobre la erección de colegios y en el programa de estudios de los jóvenes jesuitas de 1599. Regulan esos documentos la formación obligatoria en lógica, metafísica y ética, así como en matemáticas y ciencias de la naturaleza. Los textos a estudiar nombraban los libros de Euclides, la cosmografía de Oronce Fine, la astronomía del Regiomontano, las obras de Jordanus Nemorarius, "música especulativa" de Lefèvre d'Etaples, la óptica de Witelo y la *Theorica planetarum* de Peuerbach.

Con ese bagaje, desarrollado luego en años de inquisición especializada, se explican los contenidos de los textos docentes del Clementinum. Entre 1633 y 1736 aparecieron impresas al menos 16 obras matemáticas de los jesuitas de Praga, entre ellas las *Theses mathematicae* (1676) de Ioannes Hancke y la afamada *Analysis speciosa* (1720), de Jakub Kresa; dividida ésta en tres libros, abordaba las operaciones del análisis, análisis de triángulos rectilíneos y análisis de triángulos esféricos. Cotejando manuscritos, podemos seguir los cursos superiores, de matemática aplicada, impartidos en sus aulas: *De motu coeli et terrae*, dividido en 23 proposiciones sobre la forma de la Tierra, la eclíptica, el día estelar, paralaje, ecuador celeste, etc.; horologiografía, división del círculo en 24 partes, división cuatripartita del círculo en 90 grados, así como construcción de relojes solares; tablas de medición de la altura de los polos; *Ars delineandi*, con la descripción de superficies y figuras geométricas; perspectiva; *De illuminatione lunae*; modelos geométricos de la Tierra; *De magnitudine trium corporum Solis, Lunae et Terrae*; *Exercitatio astrologica*; *De stella polarum ejusque accesu ad polum*; *Tractatus de architectura*; óptica.

De ello se desprende, sin embargo, que, si bien prepararon el terreno, los jesuitas no desarrollaron la geometría algebraica. Ese avance decisivo en la evolución de la matemática correspondería a uno de sus alumnos más prestigiosos de todos los tiempos, René Descartes (*La Géométrie Algébrique*). En sentido estricto, la geometría algebraica, en cuanto disciplina matemática, emerge en el último tercio del siglo XIX, cuando se aborda la teoría general de superficies algebraicas. Pero su nacimiento vino precedido de una larga maduración, con investigaciones en diferentes sectores matemáticos *a priori* sin nexo entre sí: problemas sólidos, ecuaciones algebraicas, curvas algebraicas, geometría proyectiva, cálculo integral y análisis diofántico.

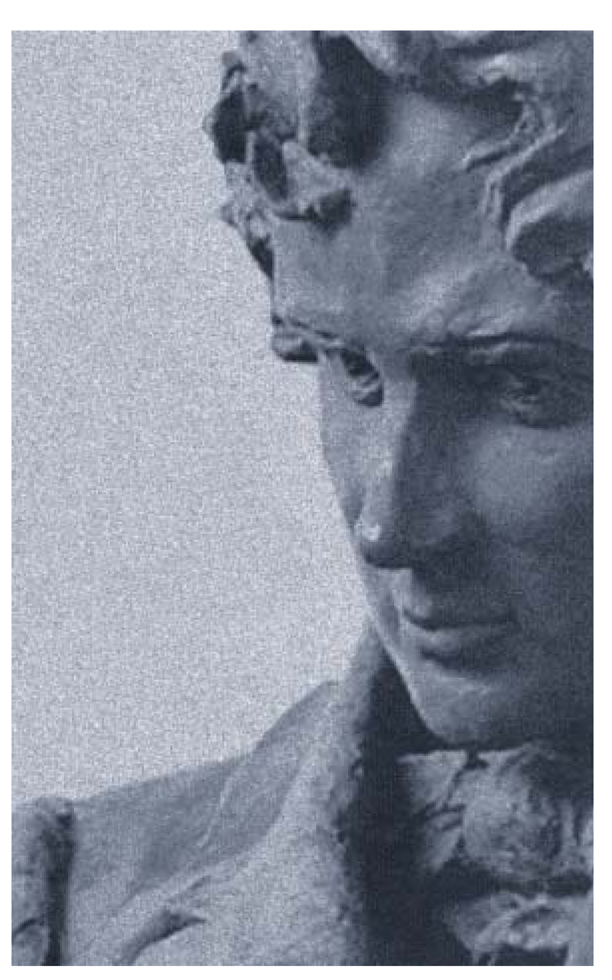
Jean Etienne Montucla (1725-1799)

La geometría algebraica elemental apuntó, por vez primera, cuando pudieron leerse las *Cónicas* de Apolonio con la ayuda del álgebra de al-Khwarizmi, es decir, en el momento en que se asoció una teoría de las ecuaciones algebraicas a la geometría de las curvas cónicas. Ocurrirá en el siglo XI. La historia de las ecuaciones algebraicas la había iniciado al-Khwarizmi en la primera mitad del siglo nono con la introducción de las nociones de ecuación e incógnita. Consideró las ecuaciones de segundo grado; las redujo a formas canónicas. Tenía términos técnicos para la incógnita (la *raíz* o la *cosa*) y para su cuadrado (*al-mal*), así como para el término constante de la ecuación, pero toda su teoría se expresa en discurso, sin abreviación o notación específica. Las generaciones siguientes emprendieron el estudio de las ecuaciones de tercer grado. Los problemas sólidos de la geometría griega comenzaron a traducirse en tales ecuaciones. Umar al-Khayyam, en particular, elabora una teoría sistemática de las ecuaciones de tercer grado y de su resolución por intersección de dos cónicas.

Hubo que esperar cinco siglos para asistir a un segundo comienzo, más firme, de la geometría algebraica. Descartes recupera, en su *Géométrie* (1637), el proyecto de al-Kwarizmi, lo generaliza y enuncia un proyecto complementario. A imagen de al-Khayyam, asocia ecuaciones algebraicas y cónicas, para en seguida ir más allá y no limitarse a las curvas cónicas. Mediante una distinción seminal entre curvas "geométricas" y "mecánicas", extiende su estudio a las curvas algebraicas. Con la ayuda de las curvas, y no sólo las cónicas, puede resolver las ecuaciones algebraicas de grado cualquiera. En la geometría de Descartes, las coordenadas de un punto de una curva son siempre segmentos y no números, pero la elección de una unidad le permite interpretar el producto de dos segmentos como un nuevo segmento. De ese modo, dispone de un cálculo sobre los segmentos análogo al cálculo numérico. Importante fue también la aportación cartesiana a la simbología. Las notaciones abreviadas se habían venido progresivamente transformando en una notación simbólica. F. Viète designa las cantidades incógnitas por vocales y las cantidades conocidas, aunque no especificadas, por consonantes. Pero sus notaciones no configuran todavía un verdadero simbolismo; el cuadrado o el cubo de una cantidad *A* se designan, respectivamente, *A quadr.* y *A cub.* Descartes puso a punto el simbolismo algebraico combinando la notación literal de Viète con la notación exponencial de las potencias.

En la senda cartesiana, Fermat, quien se ocupa de la teoría de las ecuaciones algebraicas y del estudio de los lugares geométricos, tiende un puente entre el

análisis diofántico y la geometría algebraica elemental. Pero no ofrece una interpretación geométrica del análisis diofántico, sino que se limita a aplicar métodos diofánticos para proseguir la investigación en geometría algebraica. El puente que Fermat ha tendido y que él recorre en un sentido solo, Newton lo atravesará en el sentido opuesto, sostiene Rashed, cuando aporte una interpretación geométrica del algoritmo de Diofanto (*método de la cuerda*). Será necesario esperar a finales del siglo XIX para ver desarrollar ideas de este tipo, con Sylvester, Hilbert, Hurwitz y, sobre todo, Poincaré (1901). Dos siglos antes, en 1702, Leibniz y Jean Bernoulli habían dado con una regla general para calcular una primitiva de una función racional [P(x)/Q(x)]. Su método consiste en descomponer la fracción en elementos simples $A/(x\text{-}a)^n$ correspondiente a las raíces a de la ecuación algebraica $Q(x) = 0$ e integrar esos elementos simples. A su vez, el cálculo integral fecunda la teoría de las ecuaciones algebraicas, planteando el problema del teorema fundamental del álgebra para poder integrar las funciones racionales.



Niels Henrik Abel (1802-1829)

Se trata, a renglón seguido, de integrar funciones algebraicas irracionales que no podían reducirse al caso de las funciones racionales: las integrales obtenidas son las integrales abelianas, de las cuales el caso más sencillo era el de las integrales elípticas. La resolución algebraica de la ecuación de la división del círculo en n partes iguales (con n primo) fue descubierta por C. F. Gauss (1801) en una teoría ingeniosa íntimamente ligada a la aritmética y haciendo intervenir las propiedades de simetría de las raíces. Steiner, Plücker y Salmon conjugan curvas algebraicas con los métodos de la geometría proyectiva naciente. En el siglo XX, el análisis diofántico se convirtió en uno de los campos más atractivos para ahondar en geometría algebraica, investigaciones que desembocaron en la creación de una geometría algebraica abstracta, donde las coordenadas no son ya necesariamente números reales o números complejos.

Sobre el modelo de los resultados de Moivre y de Gauss, N.-H. Abel (1827) estableció una teoría de la división de las "integrales elípticas", lo que le sugirió una clase bastante general de ecuaciones resolubles por radicales (*Niels Henrik Abel and his Times*). Hijo y nieto de pastores luteranos, los diccionarios histórico-científicos acostumbran resumir la notable labor seminal de Abel en dos hitos: pionero de la teoría de grupos y demostración de la imposibilidad de una solución algebraica de la ecuación general de quinto grado. Tras recibir las primeras letras de su padre, entró a los trece años, en 1815, en la escuela catedralicia de Cristianía (actual Oslo), donde tuvo por profesor a Bernt Michael Holmhoe, quien descubrió su enorme talento matemático. En esos años de escolar en el centro episcopal comenzó a trabajar con uno de los problemas más populares de su tiempo: cómo hallar los radicales de una ecuación de quinto grado con la ayuda de cinco métodos clásicos de cálculo (adición, sustracción, multiplicación, división y extracción de raíces cuadradas).

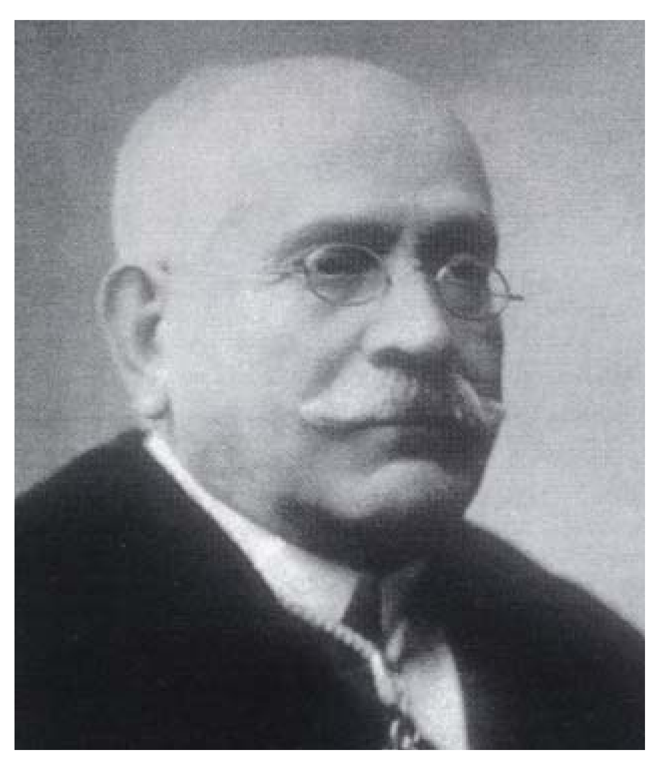
Pero Abel no brilló en la universidad, salvo en matemática. Obtuvo entonces su primer gran logro, que supuso un decisivo paso adelante en la teoría de ecuaciones: su *Mémoire sur les équations algébriques où on démontre l'impossibilité de la résolution de l'équation générale du cinquième degré*, cuyo título indica a dónde había llegado en su época adolescente. En 1823 Soren Rasmussen le pagó una estancia de dos meses en Copenhague para que conociese el extraordinario desarrollo que había adquirido allí la matemática. De la experiencia danesa salió animado a trabajar en tres frentes, la teoría de ecuaciones, la tesis de madurez (*Integración de ecuaciones diferenciales*) y las funciones elípticas.

La meca de la matemática era París. Con la idea de conocer los maestros franceses, solicitó una beca real de dos años, que le fue concedida. La fortuna le llegó, sin embargo, en una de las primeras etapas del viaje, Berlín, donde arribó en otoño de 1825. Allí conoció a August Leopold Crelle (constructor de la primera línea férrea de Berlín a Potsdam), quien le presentó en los círculos científicos de la capital. A raíz de ese encuentro, Crelle se decidió a poner en obra su proyecto más acariciado, la publicación del *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, cuyo número primero salió en febrero de 1826. En esta revista, que sigue editándose, Abel dio a conocer la mayoría de sus trabajos. En el primer número Abel detallaba con cierto pormenor su demostración de la imposibilidad de resolver por medio de radicales la ecuación general de grado 5; también aparecía un breve artículo suyo so-

bre funciones simétricas con dos variables. Gracias a los escritos de Abel, el *Crelle's Journal*, como empezó a llamarse, alcanzó muy pronto prestigio en Europa.

Abel llegó a París en agosto de 1826. Dio allí remate al trabajo que él consideraba más importante, con la esperanza de que se presentara ante la Academia Francesa de Ciencias. Se lo entregó a Adrien Marie de Legendre y a Augustin Louis Cauchy. Sin éxito. (Pocos años después, la Academia enmendó su error y le concedió un premio, "post mortem" al "escrito de París".) Quizá la frustración que ello le supuso le hiciera emitir juicios durísimos contra el catolicismo practicante de Cauchy. Pero Abel dependía mucho de Cauchy. En enero de ese mismo año, Abel abordaba las teorías de series. Se ocupó de las series binomiales, las series de la forma $(1 + x)^m$ descubiertas por Newton. Euler había tratado esta serie con una variable real x y cualquier exponente m. Cauchy lo había extendido a variables complejas. Por fin, Abel investigó el proceso en toda su generalidad, permitiendo que variable y exponente fueran números aleatoriamente complejos y resolviendo las cuestiones de convergencia. (El resultado de este trabajo apareció en el cuarto número del *Journal* de 1826, fuente de los conceptos de sumación parcial abeliana y teorema abeliano de continuidad.)

En Cauchy se inspiró Abel a propósito de la integración en el plano de números complejos, imprescindible para una teoría de las funciones elípticas. Del cálculo integral se ocupaba, en efecto, el "escrito de París". Desde los primeros pasos de la historia del cálculo integral se advirtió la existencia de muchas funciones continuas simples que no admitían integración; para ellas, pues, parecía imposible hallar antiderivadas con ayuda de las funciones elementales ordinarias. Las integrales elípticas constituían el ejemplo principal de esa situación. Abel generalizó el teorema de adición de Euler. En su corta vida, de veintisiete años, volvió una y otra vez a la teoría de ecuaciones. Su testamento fue la *Mémoire sur une classe particulière d'équations résolubles algébriquement*, aparecida en el segundo número de 1829 del *Journal*. Abel había dado con un método de expresar la relación racional entre los radicales de las ecuaciones que posibilitan soluciones algebraicas. Se trata de las ecuaciones algebraicas que admiten solución a través de lo que más tarde se llamaría *ecuaciones abelianas*, en las que el grupo de Galois es conmutativo.



Zoel García de Galdeano (1846-1924)

En el *Cours d'Analyse* de Cauchy, tenido en máximo aprecio por Abel, y en la extensión del análisis matemático desarrollada por Karl Weierstrass, se busca hoy la raíz última de la lógica matemática (*The Search for Mathematical Roots, 1870*-1940). Grattan-Guinness teje su tratado exhaustivo sobre los fundamentos en torno a Bertrand Russell y, en particular, a los *Principia mathematica* (1910-1913), redactados en colaboración con Alfred North Whitehead.

Si bien a comienzos del siglo XIX emergen en Francia nuevas álgebras, adoptadas en parte por Inglaterra, serán George Boole y Augustus De Morgan quienes se apoyarán en el álgebra para crear una lógica matematizada. Pero operan todavía con la idea tradicional del todo y las partes; a modo de ejemplo: la subcolección de los españoles es parte de la colección de hombres. La condición de miembro de la colección no se distinguía de su condición de inclusión en la misma. La teoría de conjuntos (*Mengenlehre*) introducida por Georg Cantor supone un cambio, en su doble vertiente: la topología conjuntista puntual y aritmética transfinita y la teoría general de conjuntos. A diferencia de la teoría del todo y las partes, aquí un objeto se distinguía de su conjunto unidad y pertenecía al conjunto C, mientras que los subjetos se incluían en C; por ejemplo, el objeto a pertenece al conjunto $\{a,b,c\}$ de objetos, mientras que los conjuntos $\{a\}$ y $\{a,b\}$ son subconjuntos del mismo. Con elementos de la teoría de conjuntos, Gottlob Frege esboza una versión de la lógica matemática, muy ponderada hoy, pero modestamente considerada en su tiempo.

Cobra especial auge la teoría de la medición y el análisis funcional. Charles Sanders Peirce introduce la teoría de la cuantificación, desarrollada por su escoliasta Ernst Schröder. Para completar el cuadro, hay que registrar los primeros pasos dados en la lógica fenomenológica por Edmund Husserl (formado con Weierstrass y estudioso de Cantor), los inicios de la teoría de la prueba, estimulada por la axiomatización de la geometría y la aritmética, de David Hilbert (creador de la metamatemática) y los tanteos de una teoría de modelos de F. H. Moore. A su vez, inspirada por el análisis de Weierstrass y la *Mengenlehre*, aparece la "lógica matemática" de Giuseppe Peano, que permitía expresar un extenso abanico de teorías matemáticas en términos de cálculo proposicional y cálculo de predicados con cuantificación.

Neptuno

NEPTUNE. THE PLANET, RINGS AND SATELLITES, por Ellis D. Miner y Randii R. Wessen. Springer; Chichester, 2002.

Ellis D. Miner es asesor científico y Randii R. Wessen experto en telecomunicaciones del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA en Pasadena, California, y ambos participaron en el proyecto y desarrollo del programa Voyager II, el ingenio que en agosto de 1989 alcanzó el planeta Neptuno. Por tanto, son personas autorizadas para relatarnos las incidencias de aquel extraordinario viaje de 16 años, y sus resultados científicos. Con anterioridad publicaron un libro sobre Urano (misma editorial, 1998), y un estudio científico sobre *Neptune and Triton.* Ahora han querido proporcionarnos una versión dirigida a un público extenso, sin perjuicio de su rigor científico, y lo han conseguido plenamente con este ameno y bien informado libro.

En los cuatro primeros capítulos estudian los conocimientos que ya existían sobre Neptuno, desde su sorprendente descubrimiento por Leverrier y Adams, en 1846, mediante el cálculo matemático, hasta las observaciones hechas desde Tierra en los años setenta y ochenta, que permitieron medir con sorprendente precisión todos sus elementos físicos, la composición de su atmósfera y hasta deducir por medidas fotométricas la existencia de sus sutiles anillos.

En los capítulos 5 a 7 se describe detalladamente, a veces de una forma vívida —como que sus autores la gozaron y la sufrieron— la odisea de las naves Voyager, especialmente la Voyager 2, que fue la que, tras el paso por las cercanías de Júpiter, Saturno y Urano, que sirvieron tanto de objetivo como de guías direccionales y aceleradores, llegó a las inmediaciones de Neptuno, tras una larguísima travesía llena de azares y problemas, finalmente superados. No fueron menores la escasez de luz solar (que alimentaba los paneles) y la demora de cerca de dos horas que supone lo mismo el envío de instrucciones al ingenio, que las señales que éste pueda transmitirnos. Con todo, la mayoría de los sensores, en todas las frecuencias, que portaba el Voyager, funcionaron a la perfección, o pudieron ser reprogramados a tiempo.

Los resultados de la visita a Neptuno son resumidos en los capítulos siguientes, con todas las sorpresas que reportó, y la confirmación de anteriores hipótesis de trabajo. La atmósfera de Neptuno, a diferencia de la de Júpiter y Saturno, es relativamente rica en metano, principal responsable de su color azulado. Se encontró también que la temperatura de las capas superiores es superior a la que podía esperarse, circunstancia que sólo se explica por un tipo de corriente convectiva más fuerte que en otros planetas gaseosos. También existen preciosas referencias sobre la “Gran Mancha Oscura” —un anticiclón, como la Mancha Roja joviana—, pero más efímera y oscilante. O la sorprendente magnetosfera neptuniana, desviada 47º de su eje de rotación, y que por su falta de simetría tampoco constituye exactamente un dipolo.

Finalmente, los autores estudian los huidizos e irregulares anillos de Urano (uno de ellos dotado de cinco arcos), y sus ocho satélites, de ellos dos conocidos ya de antes de la misión Voyager. El libro, dotado de una excelente estructura temática, es una lectura no sólo obligada, sino francamente grata.

—JOSÉ LUIS COMELLAS

En la teoría de conjuntos de Cantor y la lógica matemática de Peano bebieron Whitehead y Bertrand Russell. Propugnan, en los tres volúmenes de los *Principia mathematica*, que “toda” la matemática puede fundarse en una lógica matemática que comprenda el cálculo proposicional y el cálculo de predicados (incluida una lógica de las relaciones), en la que la teoría de conjuntos suministre las técnicas. El nombre “logicismo” quedó asociado a esa postura. Revisaron el logicismo Ludwig Wittgenstein y Frank Ramsey. Sus fines, resume Grattan, fueron adoptados por el Círculo de Viena, afirmativamente con Carnap pero negativamente a partir de Kurt Gödel en su teorema de incompletitud de 1931. Esta historia multidimensional de la recepción se prolonga hasta 1940, incluido el apogeo de la lógica en Polonia (Jan Lukasiewicz y Stanislaw Lesniewski, con la pronta incorporación de Alfred Tarski).

Grattan-Guinness, profesor de historia de la matemática y lógica en la Universidad de Middlessex, prestigia también la primera aproximación sistemática a la historiografía de su campo (*Writing the History of Mathematics*). Abarca esta revisión, intelectual y social, desde los primeros relatos de Eudemo, autor griego del siglo IV antes de Cristo, hasta la fundación de la revista especializada *Historia Mathematica*, a comienzos de los setenta del siglo pasado. El punto de partida evoca la importancia de la historia en el progreso de la propia disciplina, concepto muy afianzado en el amanecer de la ciencia y del que Aristóteles constituye sin duda su defensor más autorizado por lo que respecta a la física y biológica.

Writing the History of Mathematics se divide en tres partes. Repasa en la primera los países donde se ha cultivado y escrito sobre la historia de la materia, con la descripción de las instituciones, publicaciones y proyectos en torno a la misma. Aporta en la segunda 300 retratos biográficos de historiadores, para cerrar el texto con una extensa bibliografía. Resulta ilustrativo asistir al desarrollo de este enfoque unido al progreso de la matemática en los respectivos países. No es la más encomiable, sin embargo, la exposición del capítulo español (el 13). Con una perspectiva solipsista del desarrollo de la historiografía hispana, menudean afirmaciones sorprendentes a estas alturas de la investigación (supuesto abandono de las ciencias en el medievo cristiano y desinterés por la matemática en la época moderna) o se esquematizan fenómenos complejos (polémica sobre la ciencia española). Más riguroso es el relato de la historiografía española desde la segunda mitad del siglo XIX: Felipe Picatoste, Luis Octavio de Toledo, Sánchez Pérez y, sobre todo, Zoel García de Galdeano (matemático estudiado a fondo en otros lugares por uno de los firmantes) y Rey Pastor. Parecen injustas clamorosas omisiones; por ejemplo, la historiografía jesuítica, los trabajos de Santiago Garma y la que, sin duda, es la fuente principal de información sobre el decurso histórico de la matemática española, los repertorios del Instituto López Piñero, con sus trabajos anejos.

—Luis Alonso

Dennis E. Shasha

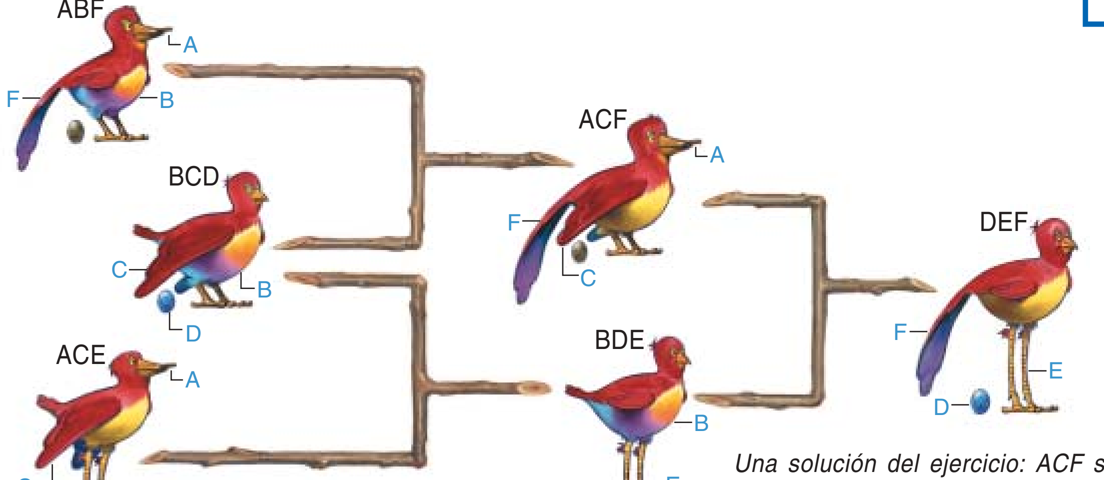
El grafo de la vida

Suele representarse la historia de la vida mediante un árbol, en el que cada especie evoluciona directamente desde una misma especie progenitora. Las especies nuevas resultan de la adaptación a condiciones diferentes de cierta parte de la población de la especie original, llegando a ser tan grande la diferencia genética entre unas y otras que dejan de cruzarse. Tal reza la descripción canónica. Pero en biología no hay absolutos. Muchos estudios inducen a pensar que, si bien *lo normal* es que los individuos de especies diferentes no se crucen, *sí* es posible que lo hagan en algunos casos. Y aún más: en ocasiones, tales cruzamientos, o hibridaciones, engendran especies nuevas.

Imaginemos que se desea rastrear los orígenes de una colección de especies, de algunas de las cuales se sabe que son especies fuente, o fundadoras, y de otras que son derivadas. Deseamos, en este problema, que cada especie derivada tenga tan pocos ascendientes evolutivamente directos como sea posible. Se denominan progenitores evolutivamente directos de la especie *X* a aquellas especies de la colección que, combinadas, proporcionan, sin intervención de ninguna más, los caracteres de *X*. Observemos que tres especies pueden combinarse y formar una especie nueva, *Y*, engendrando primero especies intermedias no observadas. Aun así, se entendería que la especie *Y* tiene tres progenitoras directas, porque se cuentan tan sólo las especies observadas. Una restricción más: ninguna especie puede aparecer antes que sus progenitoras.

Ejercicio preliminar: Se tienen tres especies fundadoras, con los caracteres ABF, BCD y ACE, respectivamente, y tres especies derivadas, de caracteres ACF, DEF y BDE. Se ha de construir un esquema de derivación que asigne a cada especie derivada un máximo de dos progenitoras (de las que una, o ambas, pudieran ser derivadas). Se expone al pie una solución. En ella, ACF y BDE han de aparecer antes de que pueda hacerlo DEF. De acuerdo con las reglas anteriores, la derivación directa de DEF a partir de las especies fuente exigiría que estas tres —ABF, BCD, y ACE— cubrieran la totalidad de los caracteres.

Problema: Se tienen cuatro especies fundadoras, con caracteres AB, DH, EF y CG, mientras que las especies derivadas poseen los caracteres BEF, DEF, ADE, ACD, ACF, ADG, BEG, y FGH. Constrúyase un esquema de derivación en el que cada una de las especies derivadas, excepto una, tenga solamente dos progenitoras evolutivamente directas. (Lo mismo que en el problema preliminar, una o ambas pueden ser derivadas.) ¿Sería posible hallar otras cuatro especies fundadoras, dotadas cada una de dos caracteres, de modo que (*a*) cada especie derivada tenga aquí sólo dos especies progenitoras directas y (*b*) la ruta que conduce desde una especie fuente hasta una derivada pase a lo sumo por otra especie derivada más?



Una solución del ejercicio: ACF se deriva directamente de ABF y BCD, BDE lo hace de BCD y ACE, y DEF, de ACF y BDE

Solución del problema del mes pasado:

Para garantizar la apertura de la caja de 10 mandos, basta ensayar las combinaciones siguientes. La primera letra de cada línea denota la posición del primer mando; la segunda, la del segundo, y así sucesivamente. La letra A indica posición alta, la B, posición baja, y la C, central. Una X indica que la posición es indiferente.

1. A A A A A A A A A A
2. A B B B B B B B B B
3. A C C C C C C C C C
4. B A B C A B C A B C
5. B B C A B C A B C A
6. B C A B C A B C A B
7. C A C B A C B A C B
8. C B A C B A C B A C
9. C C B A C B A C B A
10. X A A A B B B C C C
11. X A A A C C C B B B
12. X B B B A A A C C C
13. X B B B C C C A A A
14. X C C C A A A B B B
15. X C C C B B B A A A

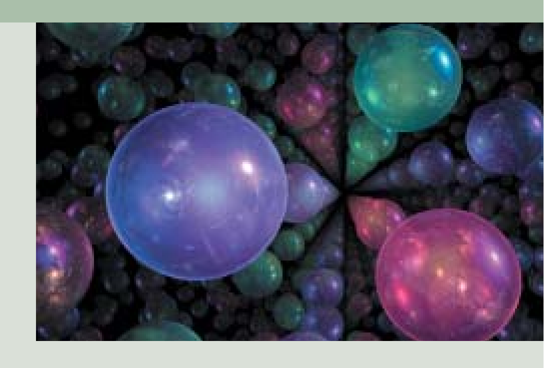
Solución en la Red

Se puede ver una solución más completa de este problema y la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.

EN EL PROXIMO NUMERO...

...DE JULIO 2003





UNIVERSOS PARALELOS, por Max Tegmark

Más allá de su carácter altamente especulativo, los universos paralelos constituyen una realidad probable. Podrían darse incluso en cuatro formas distintas. Por lo demás, gozan de un sólido anclaje en las observaciones cosmológicas.

MECANISMOS CEREBRALES DE LA SINESTESIA, por Vilayanur S. Ramachandran y Edward M. Hubbard

En el extraordinario mundo de la sinestesia los sentidos se confunden y revelan claves decisivas para desentrañar la organización y funcionamiento del cerebro humano.



REDES SIN ESCALA, por Albert-László Barabási y Eric Bonabeau

Existen sistemas complejos de apariencia dispar que poseen, subyacentes, arquitecturas organizadas por unos mismos principios. Tal hecho reviste importantes consecuencias en multitud de aplicaciones, desde el desarrollo de fármacos hasta la seguridad de Internet.

ORDENADORES, PARADOJAS Y FUNDAMENTOS DE LAS MATEMATICAS, por Gregory J. Chaitin

Grandes pensadores del siglo XX han demostrado que, en el mundo austero de la matemática, son entidades habituales la incompletitud y la aleatoriedad.

ABRAHAM ZACUTO Y LA ASTRONOMIA EUROPEA EN EL MUNDO ARABO-ISLAMICO, por Julio Samsó

El "Almanaque perpetuo" de este astrónomo salmantino es uno de los escasos ejemplos de obras científicas renacentistas traducidas al árabe y difundidas desde Marruecos hasta el Yemen.



EL HOMBRE DE LOS HIELOS, por James H. Dickson, Klaus Oeggl y Linda L. Handley

¿De dónde procedía el Hombre de los hielos y qué hacía en ese paso a gran altitud cuando murió? Estudios meticulosos, especialmente de los restos vegetales hallados en el cuerpo, modifican muchas de las interpretaciones avanzadas a raíz de su descubrimiento.

REACCION ANTE LOS FARMACOS HUERFANOS, por Thomas Maeder

El Decreto de Medicamentos "Huérfanos" de 1983 debía incentivar el desarrollo por la industria privada de fármacos necesarios, sin ánimo de lucro, para el tratamiento de dolencias inusuales.



AURORAS NEGRAS, por Göran Marklund

Estas regiones desprovistas de luz acompañan a las auroras boreales, de las que son una especie de negativo. Escapan de ellas los electrones ionosféricos; tras de sí dejan agujeros en la densidad electrónica de la atmósfera.